

非構造部材を活用した車体剛性向上手法

瀧上 唯夫* 富岡 隆弘* 相田 健一郎*

Improving Rigidity of Railway Vehicle Carbody by Utilizing Non-Structural Members

Tadao TAKIGAMI Takahiro TOMIOKA Ken-ichiro AIDA

For this study, "Rigidity Test Car," have been designed and manufactured to investigate how non-structural members in the carbody influence on the rigidity and the vibration characteristics of a commuter type railway vehicle. Reinforcing beams and pillars, which are so designed as to be easily attached or removed, are attached to the ceiling, the side panels and the floor. Static load and excitation tests have been performed, and the results have shown that the non-structural members, as well as the main (outer) body structures, have affected the equivalent rigidity, natural frequencies, vibration shapes and response accelerations of the carbody.

キーワード：乗り心地，車体剛性，非構造部材，内部骨組，構体荷重試験，固有振動モード

1. はじめに

近年の鉄道車両の軽量化やそれともなう車体構造の変化，乗客の快適性に対する要求の高まりとともに，乗り心地の観点から車体の上下曲げ振動が注目されるようになってきた。振動乗り心地など，快適性向上の検討は，新幹線などの優等列車で先行していたが，最近では，在来線通勤車両などに対しても，車体曲げ振動低減のための取り組みが進められるようになってきた。

在来線通勤車両で主流のひとつとなっているステンレス鋼製の軽量車体は，車体の軽量化，製造工程の省力化，走行時のエネルギー消費軽減などに貢献しているが，一方でこれまでの振動測定により，床，屋根，側といった車体を構成する各面が，独立に振動する傾向があることがわかった^{1) 2)}。そこで，鉄道総研では，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っている。

ここでは，その一環として，上記のようなコンセプトで製作した「剛性試験車体」の概要を紹介する。また，剛性向上の効果を，静的には等価曲げ・ねじり剛性で，動的には車体固有振動数および振動形状の変化によって評価することとし，そのために実施した構体荷重試験，車両試験台による加振試験結果について述べる。

2. 剛性試験車体

2.1 剛性試験車体の概要

剛性試験車体（図1）は，車体全体としての強度を主に担う外部構体については，基本的に営業運転に供され

ているステンレス鋼製軽量車体（以下，ベース車体と呼ぶ）の設計をそのまま利用した。一方で，内装品の設置などの目的で車内に取り付けられている，内部骨組などの非構造部材を積極的に利用して，車体の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。

このようなコンセプトとしたのは，従来は強度を負担する構造部材として明示的に着目されていなかった蛍光灯受や戸袋内柱などの内部骨組により，車体の振動特性が変化することが，これまでの振動測定により明らかになったことが動機となっている。また，車体の仕様は荷重や走行振動に対する強度（構体荷重試験の要求を満たすなど）のほか，製造時の「作りやすさ」（工程の省力化，納期短縮，コスト削減など），そのほか様々な要求を考慮して決定されたため，量産車の構体設計・製造工程はその車種向けに最適化されていることが多い。したがって，主として強度を担う外部構体の変更は，多大な労力やコストを要するため容易ではなく，内部骨組の設計変更や後付の補強部材の追加の実施が，比較的容易で現実的と考えられる。

このような検討を踏まえ，剛性試験車体では，車内に取り付けられる内部骨組に関して，表1に示すような剛性向上策を適用した。



図1 剛性試験車体の外観

* 車両構造技術研究部（車両振動）

特集：車両技術

表1 剛性試験車体における剛性向上策

(A) 溶接にて取付			
記号	項目	内容	方向
(A-1)	蛍光灯受 (強化)	・軽量穴廃止 ・一部(リング化構造部)板厚増	長手
(A-2)	幕板受 (強化)	・軽量穴廃止 ・一部(リング化構造部)板厚増 ・全長にわたり溶接で一体化	長手
(B) ボルトにて取付			
記号	項目	内容	方向
(B-1)	天井骨組補強 (新規追加)	・2本の蛍光灯受間に取付 ・蛍光灯受・幕板受間に取付	まくらぎ
(B-2)	戸袋内柱 (強化)	・戸袋内柱(戸先)の板厚増 ・戸尻側に柱を追加	高さ
(B-3)	床根太 (新規追加)	・床波板上に補剛部材追加	まくらぎ
(B-4)	リング化構造 (新規追加)	・相互間を「つなぎ金」で結合 ※(B-1)～(B-3)の位置を合致	—

2.2 長手方向の剛性向上

表1の(A-1)および(A-2)は、ベース車体の車内にも存在する蛍光灯受、幕板受といった内部骨組の特性および形状を変更したもので、長手方向の剛性向上を目指したものである。これらは、現用品と同様に、車体に対して溶接で取付けており、後述する(B)の構成部材とは異なり、着脱に関しては考慮していない。

2.3 リング化構造

車体のまくらぎ・高さ方向については、表1中の(B1)～(B4)に示した補強部材を、それぞれ図2～4のように取付けた。図2の天井骨組補強は、ベース車体には存在しないもので、前述の蛍光灯受間、および蛍光灯受・幕板受間にまくらぎ方向に取付けるものである。図3の戸袋内柱は、ベース車体にも取付けられているが、戸先側の柱の板厚を増加させたほか、現用品には存在しない戸尻側の柱を追加して剛性向上をはかっている。図4はベース車体には存在しない床根太であり、床波板上にまくらぎ方向に取り付ける。

これらの補強部材は戸袋部の「リング化」構造(後述する図6右図の橙点線参照)を実現して、車体各面の面外変形を抑制するもので、取付個所は各側引戸の両側戸袋部とした。さらに、天井骨組、戸袋内柱、床根太の相互間は、取付部の剛性向上もしくはつなぎ金の追加により、各面間の相対的な角度変化の抑制も考慮した設計とした(図3(b)および図4(b))。図5の橙色部は天井骨組補強および床根太の配置を表し、戸袋内柱の2ヵ所の柱の位置と一致させてある。なお、図5の赤丸印は後述の4.4節における振動評価点であり、詳細については後述する。

補強部材(B-1)～(B-4)は、部材の有無による車体剛性・振動特性の変化を調査するため、ボルトにより着脱可能な構成としている。将来的には最適な条件を決定した上で、各部材相互間を溶接により固定し、ボルト締め時との特性の比較も行う予定である。

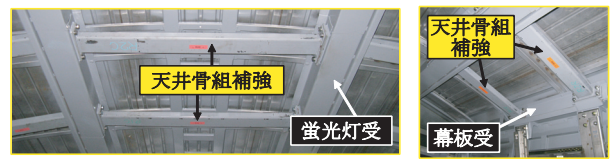


図2 天井骨組補強取付状況

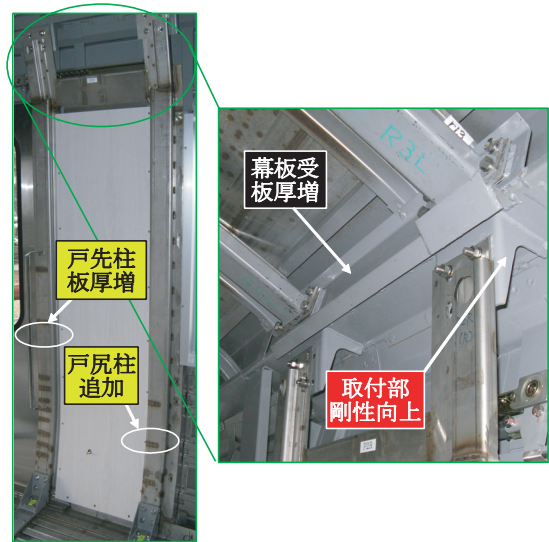


図3 強化型戸袋内柱取付状況

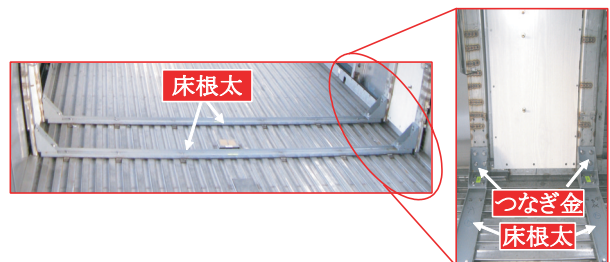


図4 床根太取付状況



図5 リング化構造の配置と振動測定点

以下では、上述の「蛍光灯受」「幕板受」を取付けた状態(図6左図から戸袋内柱を取り外した状態)を便宜上「【C0】構体条件」と呼ぶ。ただし、これは営業車の構体とは異なる。この構体条件に対して、営業車と同等の戸袋内柱を取り付けた場合(図6左図の状態)を「【N1】通常条件」、また「【C0】構体条件」に補強部材(B-1)～(B-4)を全て取り付けた場合(図6右図の状態)を「【R4】補強条件」と呼ぶことにする。【 】内の記号・数字が連続していないのは、後述する図7と記述を一致させるためである。なお、質量は天井骨組補強が合計で約500kg、

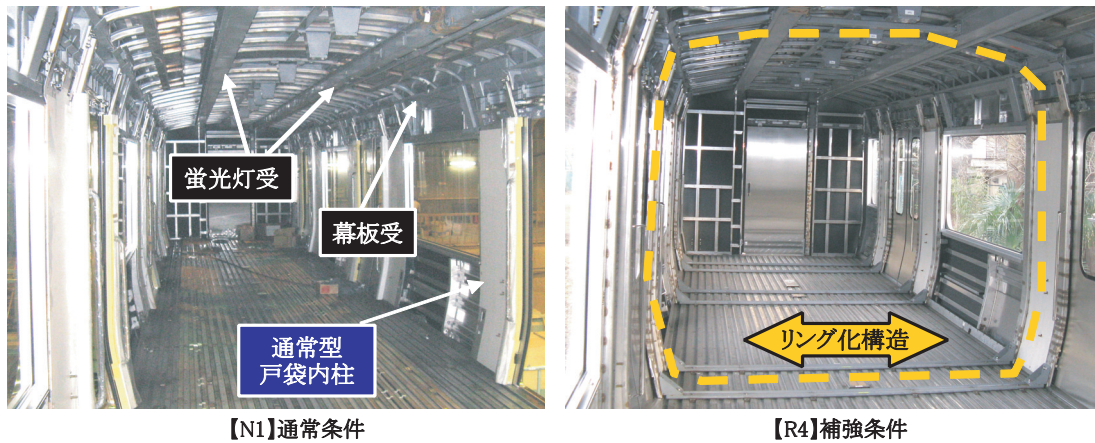


図6 剛性試験車体の車内状況

床根太が240kgであり、戸袋内柱については、強化型と通常型の差が約480kgとなったため、【R4】補強条件の車体は、【N1】通常条件と比較して、約1.2tの質量増となっている。

3. 構体荷重試験

前節で説明した非構造部材による補強が車体剛性に与える影響を調査するため、【C0】構体条件、【N1】通常条件、【R4】補強条件それぞれの状態で、JIS E7105³⁾ およびE7106⁴⁾ に基づく垂直荷重試験、ねじり荷重試験を実施した。荷重負荷時のたわみ量と、その値から得られる等価曲げ剛性、等価ねじり剛性を計算した結果を表2に示す。これにより、非構造部材を活用することで、車体剛性の向上が可能であることが確認された。【N1】通常条件の車体は、【C0】構体条件と比較して等価曲げ剛性が約5.6%、等価ねじり剛性が約9.0%向上している。【R4】補強条件の車体は、【N1】通常条件と比較して、さらに等価曲げ剛性が約7.2%、ねじり剛性が約9.1%上昇し、【C0】構体条件に対する向上率はそれぞれ約13、19%となった。

表2 構体荷重試験結果

種別	車体条件	たわみ mm	相当曲げ剛性 Nm ²
垂直 荷重試験 (355kN 負荷)	【C0】 構体条件	9.2	7.48×10^8
	【N1】 通常条件	8.7	7.90×10^8
	【R4】 補強条件	8.1	8.47×10^8
種別	車体条件	たわみ mm	相当ねじり剛性 Nm ² /rad
ねじり 荷重試験 (40kNm 負荷)	【C0】 構体条件	3.6	2.01×10^8
	【N1】 通常条件	3.3	2.19×10^8
	【R4】 補強条件	3.1	2.39×10^8

4. 車両試験台加振試験

前章で求めた等価曲げ剛性は、JIS E7106 に記載された算出方法⁴⁾ に基づいているが、これは「荷重負荷時の

車体たわみと、中央部において同一のたわみ変形を生じる一様なはりの剛性」を計算するものであり、等価ねじり剛性についても、同様の仮定に基づいて計算を行う。一般に、一様なはりの固有振動数は長さ一定の場合、曲げ剛性と質量の比の平方根に比例するが、実際の車体は必ずしも一様なはりを見なせない構造であり、得られた剛性の向上率と曲げ振動モードの固有振動数の上昇率を、明確に関連付ける指標は存在しない。特に、本報告で対象としているステンレス鋼製車体は、前述したとおり複数の曲げ振動モードが存在するため、振動特性の変化については、加振試験を実施して直接評価する必要がある。

そこで、補強部材 (B-1) ~ (B-4) の取付状態による車体振動特性の変化を調査するため、車両試験台による加振試験を実施した。車両試験台は、供試車両の車輪を軌条輪と呼ばれる装置の上に積載し、軌条輪の回転により走行を模擬しながら、軌条輪が上下・左右に変位することにより、加振を行う装置である。

4.1 試験条件

加振入力として、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入力して、全軸を上下に加振するバンドランダム加振と、実軌道の上下不整を模擬した加振の2種類を考えた。車体の振動は、床、側、屋根に貼付した加速度ピックアップにより計測した。バンドランダム加振は主に後述する振動モード解析に、実軌道模擬加振は車体の振動加速度と乗り心地指標の評価に用いる。

4.2 車体条件

車体の条件は、それぞれの補強部材の影響を把握するため図7に示した7条件 (【C0】、【N1】~【N3】、【R1】、【R3】、【R4】) とした。図中の○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

特集：車両技術

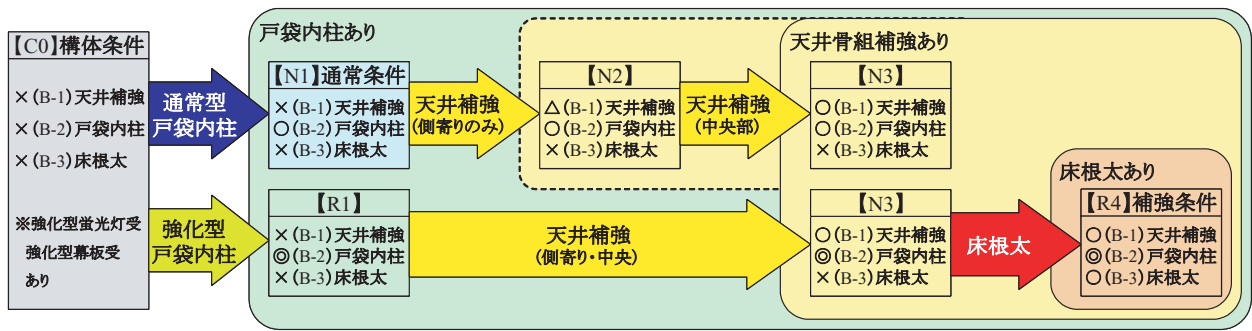


図7 加振試験時の車体条件

を表し、天井骨組補強は○が全数、△は側寄り（蛍光灯受・幕板間）のみ取付けた状態である。

【C0】は構体荷重試験における構体条件，【N1】は通常条件と同一であり，【N2】，【N3】は【N1】に対して天井骨組補強を順次取付けた状態である。また，【R1】は【C0】に対して強化型戸袋内柱を取付けた条件，【R3】，【R4】はそれぞれ，さらに天井骨組補強，床根太（同時につなぎ金）を取付けた状態で，【R4】は構体荷重試験の補強条件と同一である。

4.3 振動モード解析

図7に示した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。紙面の都合上，全条件の結果を掲載できないため，【N1】通常条件，【R4】補強条件で同定された代表的なモード特性を図8に示す。【C0】構体条件については，固有振動数は異なるものの，形状は【N1】条件とほぼ同様であった。なお，振動形状は，変形をわかりやすく表現するため振幅を規格化しており，異なる振動モード間では振動の大きさを直接比較できないことに注意が必要である。

図中の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。それに続く数値は各モードの固有振動数，モード減衰比である。また，その他の条件を含めて固有振動数の変化をまとめたものを表3に示す。なお，図8【N1】条件のZ-10モードと【R4】条件のS-11モードなど，記号は異なっても形状が類似したモードは，同じ欄に示した。

4.3.1 戸袋内柱の影響

車体条件【C0】と【N1】，もしくは【C0】と【R1】を比較すると，それぞれ通常型戸袋内柱，強化型戸袋内柱が車体振動特性に与える影響がわかる。表3を見ると，戸

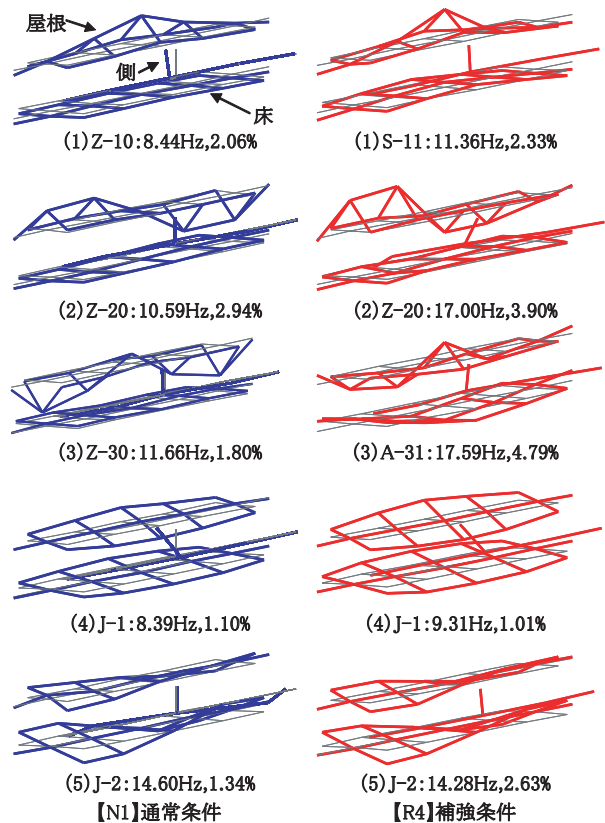


図8 固有振動モード特性

袋内柱により，固有振動モードのうち，特にZ-10，Z-20，Z-30といった，床に対する屋根の変形が相対的に大きいモードの固有振動数が上昇している。これは，戸袋内柱が側の面外変形を抑制する効果もあるが，特に側・屋根構体間の角度変化を拘束することによる剛性向上の影響が大きいと考えられる。また，固有振動数の上昇傾向は通常型よりも質量の大きい強化型戸袋内柱で強く（【N1】と【R1】の比較），剛性向上効果が質量増加の影響を上回っていることがわかる。

4.3.2 天井骨組補強の影響

車体条件【N1】と【N3】もしくは【R1】と【R3】の差異は天井骨組補強の影響によるものである。【N1】では，前述のとおり床に対して屋根の変形が相対的に大きい振動モードが見られるが，天井骨組補強により，屋根

表3 各条件における固有振動数 [Hz] の比較

記号	通常型戸袋内柱の比較				強化型戸袋内柱の比較			
	【C0】	【N1】	【N2】	【N3】	【C0】	【R1】	【R3】	【R4】
(1) Z-10/S-11	6.96	8.44	8.65	10.44	6.96	9.62	11.29	11.36
(2) Z-20/Z-21	9.02	10.59	10.98	13.28	9.02	12.13	16.76	17.00
(3) Z-30/A-31	10.63	11.66	11.96	13.85	10.63	13.27	17.78	17.59
(4) J-1	8.28	8.39	8.52	8.53	8.28	8.43	8.88	9.31
(5) J-2	14.89	14.60	14.64	14.61	14.89	14.37	14.36	14.28

と床の振幅が接近する傾向が認められる。たとえば【N1】のZ-10モードは、【R3】では屋根中央部の1点をのぞいて屋根と床がほぼ同程度の振幅となり、「はり」の変形に類似した振動形状のS-11モードに変化した(形状は図8右図の【R4】(1)S-11モードとほぼ同一)。

条件【N2】は天井骨組補強のうち、側寄のみ(図2(b))を取り付けたものであるが、【N1】との固有振動数の差は小さく、天井骨組補強は部分的な施工では剛性向上効果は期待できず、全周にわたって取付けることにより、はじめて効果が得られることがわかった。

4.3.3 床根太の影響

条件【R3】と【R4】の差異は、床根太の影響によるものであるが、振動特性に与える影響は小さい。J-1モードの固有振動数が上昇しているが、これは床根太そのものよりも、床根太・戸袋内柱の接続部に取付けた「つなぎ金」が、両者の角度変化を拘束したことによるものと考えられる。

4.3.4 J-1およびJ-2モードへの影響

J-1, J-2モードの固有振動数については、戸袋内柱、天井骨組補強の有無による変化は小さく、J-2モードではむしろ補強により低下する傾向が見られた。今回取付けた補強部材は、剛性向上に寄与するとともに、質量の増加にもつながっていることから、これらのモードに対しては、後者が前者の影響を上回ったためと考えられる。なおこれらのモードは、Z-10のように補強とともに振動形状が変化するモードとは異なり、補強条件にかかわらずほぼ同一形状のまま不変であった。これらのモードは、アルミ合金製の通勤車両、新幹線車両などでも見られ¹⁾²⁾、現行の鉄道車両用車体では、構造の差異や小規模な補強の施工では変化しないモードであると考えられる。

4.4 実軌道模擬加振に対する応答

車両試験台で走行状態を模擬するため、走行時に実測した軸箱加速度を再現する加振を実施し、車体の振動加速度を測定した。図5の赤丸で示した評価点4点において測定した加速度のパワースペクトル密度(PSD)を計算した結果を図9に示す。図中の青線は【N1】通常条件、赤線が【R4】補強条件のPSDを示す。

4.4.1 Z-10およびS-11モードへの影響

【N1】構体条件のPSD(図9の青線)の8.5Hz付近に見られるピークは、図8に示したモードのうち、(1)Z-10モードによるものと考えられる。図8および表3によ

ると、このモードの固有振動数は、【R4】では形状が類似したS-11モードに変化して固有振動数が11.36Hzに上昇しており、これに対応してPSDのピークが高周波側に移動していることがわかる(図9の赤線)。

4.4.2 Z-20モードへの影響

図8の(2)Z-20モードは、【N1】条件では10.5Hz付近のピークに対応する。一方【R4】では、図8に示した固有振動モードとしては同定されているものの、固有振動数に対応する17Hz付近にPSDの卓越したピークは見られない。このモードの振動形状は車体中央の前後、特に前後台車の直上付近で屋根の振幅が大きく、振動の腹が戸袋内柱、もしくはリング化構造が配置されている位置に近いことから、屋根の面外変形が拘束され、固有振動数が大幅に上昇するとともに、振動が励起されにくくなったものと推察される。

4.4.3 Z-30およびA-31モードへの影響

図8(3)によると、【N1】条件のZ-30モードは、【R4】ではリング化構造の影響によりモード形状がA-31に変化し、屋根に対する床の変形が相対的に大きくなっている。ただし、図8は振動振幅を規格化して描画しており、床の振動そのものが大きくなったことを示すものではない。これは、【R4】の17.5Hz付近のPSDピーク(A-31モードに対応)が、【N1】の11.5Hz付近のピーク(Z-30モードに対応)と比較して特に卓越はしていないことから確認できる。

4.4.4 J-1およびJ-2モードへの影響

図8に示した振動形状から判断すると、(4)J-1モードは図5に示した測点4で振幅が大きくなる特徴があり、ピーク位置は固有振動数の変化とともに移動していることがわかる。また、(5)J-2モードは測点3でピークが顕著である。前節でも述べたが、J-1, J-2モードは補強による固有振動数の変化が少ないため、PSDのピークの移動幅は少なく、J-2に対応するピークは【N1】(青色)よりも、【R4】(赤色)が低周波側に現れている。

4.4.5 乗り心地レベル

図9の凡例中には、実軌道模擬加振時に測定した加速度から乗り心地レベルを算出した結果を合わせて示した。今回試験を実施した剛性試験車体は、内装や腰掛等の車内設備、床下機器等のぎ装品が非装着のため、通常の車両の乗り心地と同様の乗り心地評価を行うことは必ずしも適切ではないが、どの測点でも【R4】補強条件の乗り心地レベルは【N1】条件を下回っており、乗り心地

特集：車両技術

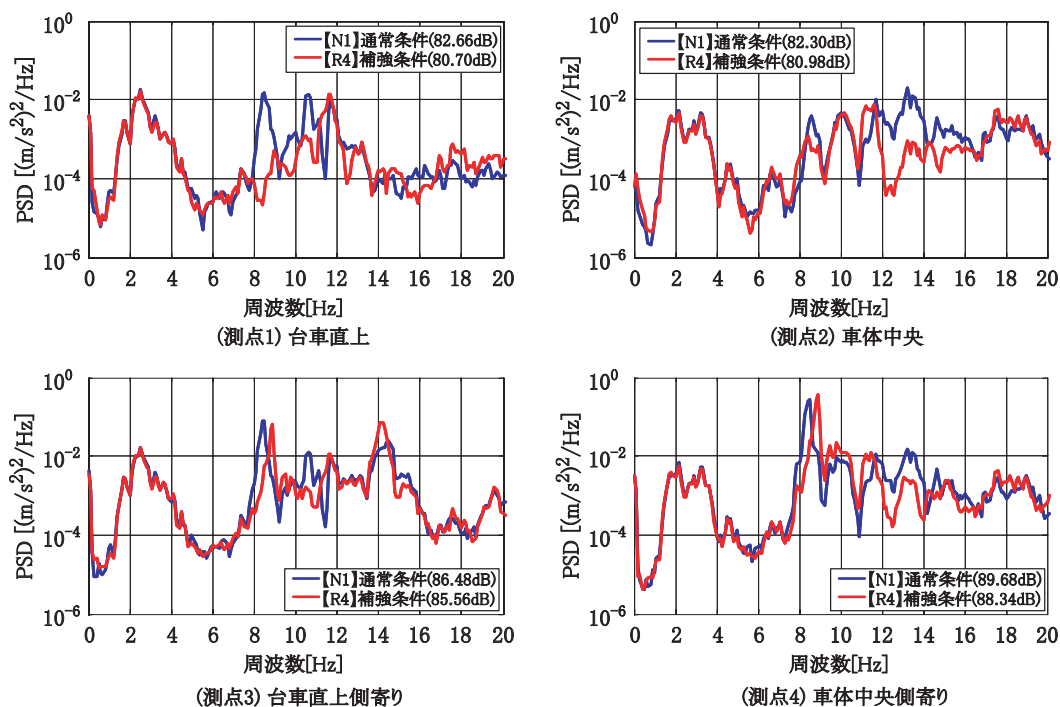


図9 実軌道模擬加振時の車体床上加速度 PSD

が向上する方向に変化する傾向が認められる。これは、PSDの形状からもわかるように、ピークが鈍ったことによるものではなく、乗り心地に影響が大きい20Hz以下の周波数帯域において、卓越するピークの数が増加した結果によるものと考えられる。このように、車体の各面が独立に変形し、複数の振動モードが乗り心地に影響するという、現状のステンレス鋼製車体の特性が、リング化構造により変化し、車体が「はり」として振動する傾向に近づけることで、全体として車体曲げ振動の低減効果も期待できることが示された。

5. まとめ

本研究では、従来は強度部材として考慮されていなかった、内装品取付などを目的とする補助的部材である内部骨組を活用した車体の剛性向上をめざし、剛性試験車体を設計・製作した。構体荷重試験、車両試験台加振試験を実施して、車体剛性の評価を行ったところ、外部構体を変更することなく、内部骨組の補強・追加により、車体の剛性、振動特性が大きく変化することが確認できた。

特に、戸袋部にリング化構造を構成することにより車体各面が独立して変形する振動が抑制され、乗り心地に影響が大きい20Hz以下の周波数帯域では、車体全体が「はり」として振動する傾向に近づけることが確認できたのは重要な知見である。このことは、直接的に乗り心地向上につながるわけではないが、今回の実軌道模擬加振試験では、PSDのピーク数が増加することにより、乗り心地が向上する傾向が見られた。そのほかにも、ピーク

数の減少により、振動低減策を検討するにあたっての見通しがよくなることが期待できる。

今後は、各補強部材の効果をさらに詳細に検討するとともに、床下機器など、今回考慮しなかった非構造部材が車体剛性に与える影響についても調査を進める予定である。また、今回適用した補強部材は質量増加が比較的大きいため、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設計を行う必要があると考えられる。

一方、今回のリング化構造は振動特性のうち、固有振動数や振動形状を変化させる効果は得られたが、卓越したピークを鈍らせて振動を直接減少させる効果は小さい。今後は補強部材を減衰部材に置き換えるなど、振動を減衰させて低減させる方策についてもあわせて検討し、最終的には乗客が感じる振動を低減させ、乗り心地向上をめざした検討を進める考えである。

文献

- 1) 瀧上, 富岡: 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, pp.22-28, 2002.
- 2) 相田, 富岡, 瀧上: 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, pp.143-146.
- 3) 日本工業規格: 鉄道車両—旅客車用構体—構体試験方法, JIS E7105:2006.
- 4) 日本工業規格: 鉄道車両—旅客車用構体—設計通則, JIS E7106:2006.