

非構造部材を活用した車体剛性向上方法

車両構造技術研究部 車両振動

主任研究員 瀧上唯夫

1. はじめに

近年の鉄道車両の軽量化やそれにとまなう車体構造の変化、また、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。最近では、新幹線などの優等列車だけでなく、在来線通勤車両などの一般的な車両に対しても、車体曲げ振動低減のための取組みが進められている。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、従来強度部材として考慮されていなかった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」の概要を紹介し、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の設計をそのまま利用しているが、車内に取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。

これは、従来強度を負担する構造部材としてあまり着目されていなかった「内部骨組」によって、車体の振動特性が変化することが、これまでの振動測定で明らかになったのがひとつの動機である。また、外部構体は荷重や走行振動に対する強度（構体荷重試験の仕様を満たすなど）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る。よって、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く、その変更は多大な労力を要するため容易ではないため、内部骨組の設計変更や後付の補強部材の追加のほうが、実施が比較的容易で現実的と考えたからである。

このような検討を踏まえ、剛性試験車体では、車内に取付けられている内部骨組に関連して「蛍光灯受」および「幕板受」の軽量穴の廃止、リング化構造(下記参照)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、表 1 に示す車体周方向の補強部材を取付けることにより、戸袋部の「リング化」構造を実現する設計とし、車体各面の面外変形の抑制をめざした。なお、これらの部材



図 1 剛性試験車体の外観

表 1 内部骨組による車体周方向の剛性向上策

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	—

は、その有無による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。

以下では、上述の「蛍光灯受」「幕板受」を取付けた状態を便宜上「【C0】構体条件」と呼ぶ(営業車のものとは異なる)。これに対して、営業車と同等の戸袋内柱を取付けた場合を「【N1】通常条件」、また、「【C0】構体条件」に補強部材(B-1)～(B-4)を全て取付けた場合を「【R4】補強条件」と呼ぶことにし、車内の状況を図2に示す。なお、【 】内の記号・数字が連続していないのは、後述する図3と記述を一致させるためである。

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】補強条件で、JIS E7105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、得られたたわみ量から等価曲げ剛性、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、非構造部材が車体剛性を向上させる効果があることが確認され、補強条件の車体は構体条件と比較して等価曲げ剛性が約13%、等価ねじり剛性が19%向上した。

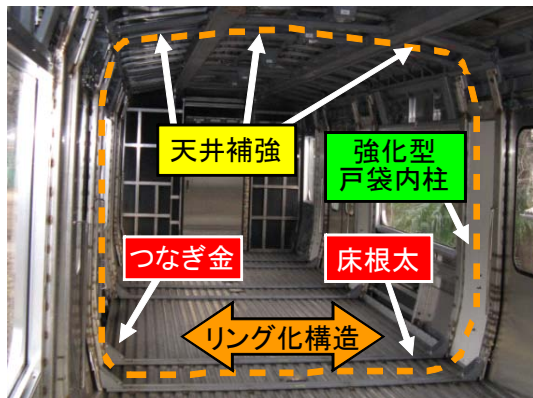


図2 【R4】補強条件の車内状況

表2 構体荷重試験結果

種別	荷重 kN	車体条件	たわみ mm	相当曲げ剛性 Nm ²
垂直 荷重試験	355	【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	荷重 kNm	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	40	【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. 車両試験台による加振試験

4.1 試験条件

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。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。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3に示した7条件(【C0】、【N1】～【N3】、【R1】、【R3】および【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。

4.2 試験結果

4.2.1 固有振動モード解析

図3に示した各車体条件に対して固有振動モード解析を実施し、車体の固有振動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、【C0】構体状態で同定された代表的なモード特性を図4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、1つ目が屋根、2つ目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、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

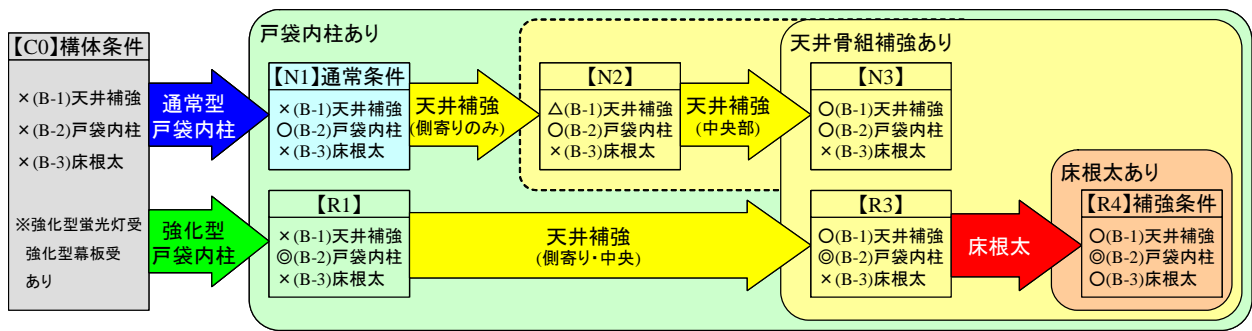


図3 加振試験時の車体条件

表3 各条件における固有振動数の比較

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

衰比である。また、各条件の固有振動数の変化をまとめたものを表3に示す。なお、図4のZ-10モードと後述する図5のS-11モードなど、記号は異なるものの形状が類似したモードは、同じ欄に示した。

4.2.2 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、戸袋内柱により、固有振動モードのうち、特にZ-10、Z-20、Z30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・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効果と考えられる。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効果を上回っていることがわかる。

4.2.3 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】【R1】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、屋根と床の振幅が接近する傾向が認められた。たとえばZ-10モードは、【R3】では振動形状が図5のように変化し、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で振動し、「はり」としての振動に近づく振動形状に変化した(S-11モード)。また、条件【N2】は天井骨組補強のうち、まくらぎ方向の側寄のみを取付けたものであるが、【N1】との固有振動数の差は小さく、天井骨組補強は全周にわたって取付けることにより、はじめて剛性向上効果が得られることがわかった。

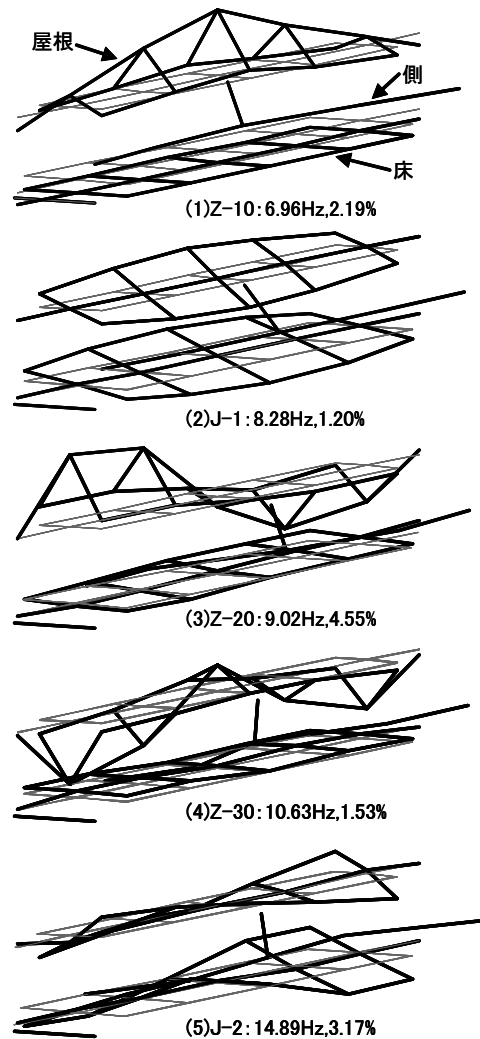


図4 【C0】構体条件の固有振動モード

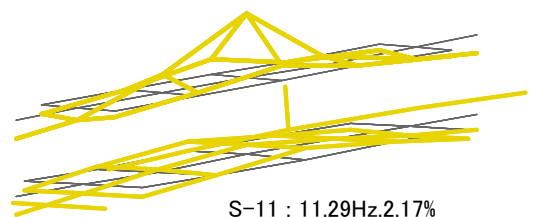


図5 【R3】条件のS-11モード

4.2.4 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。

4.2.5 J-1, 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。補強部材は、剛性向上に寄与するとともに、質量増加もともなうことから、後者が前者の効果を上回ったためと考えられる。これらは 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であった。これらの振動モードは、アルミ合金製の通勤車両、新幹線車両などでも見られ¹²⁾、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、普遍的なモードであると考えられる。

5. 軽量化の可能性検討

各補強部材が車体の振動特性にそれぞれ特徴的な影響を与え、特に天井骨組補強の追加によって、車体ははりとして振動する傾向を示すことが、加振試験によりわかった。一方で、使用した部材は試験的要素が強く、質量増加が大きい。そこで、補強の効果をできる限り維持しつつ質量を減少させる検討を、有限要素法(FEM)モデルを用いて行った。車体条件【N1】通常条件に、天井骨組補強 16 組を取付けた【N3】のほかに、図 6 の赤色で示す位置に 6 組のみの補強を取付けた【N3d】条件について、FEM 解析により振動形状と固有振動数を求めた結果を図 7 に示す。【N1】では床に対する屋根の相対変形が大きく【N3】でははりに近い形状となるなど、実測の傾向を再現できていることがわかる。【N3】と軽量化した【N3d】の比較では、振動形状、固有振動数にほとんど変化がなく、補強の質量を 60%以上低減しても、同様の効果が見込めることがわかった。

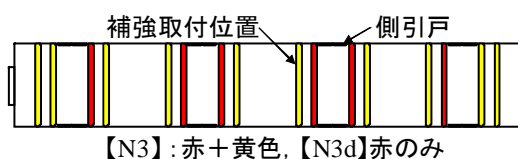


図 6 天井骨組補強取付位置

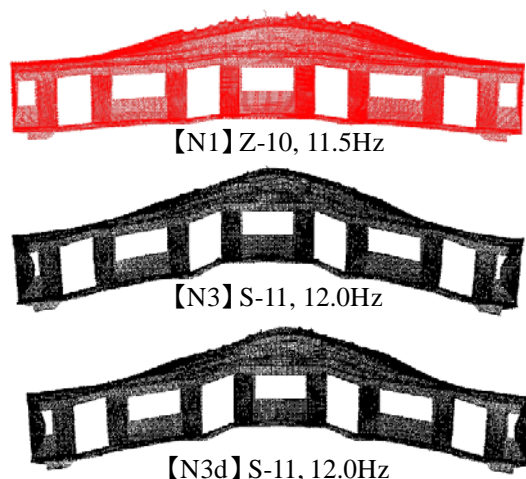


図 7 天井補強本数減少による特性変化

6. まとめ

従来強度部材として考慮されていなかった内部骨組を利用した補強により、車体の振動特性が大きく変化することが確認できた。また、リング化構造を構成することによって、車体各面が独立して変形する振動が抑制され、車体が一本のはりとして振動する傾向に近づけることができた。このことが直接乗り心地向上につながるわけではないが、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、今回示した FEM 解析結果を実際に検証するとともに、既存の部品を活用するなど、より実用性を考慮した設計を行って実用化をめざす予定である。

文献

- 1) 瀧上, 富岡, 鉄道総研報告, Vol.16, No.5, (2002), pp22-28.
- 2) 相田, 富岡, 瀧上, J-Rail2007 講演論文集, (2007), pp143-146.