

天井内部骨組による車体剛性向上手法の検討

○ [機] 瀧上 唯夫 [機] 富岡 隆弘 [機] 相田 健一郎 (鉄道総研)

Investigation on Improving Rigidity of Railway Vehicle Carbody
by Utilizing Inner Ceiling Frames

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

The focus of this paper is to investigate how non-structural members, especially ceiling frames, in the carbody influence on the rigidity and the vibration characteristics of a commuter type railway vehicle. Reinforcing beams, posts and joists, which are so designed as to be easily attached or removed, are installed to the ceiling, the side panels and the floor of the "Rigidity Test Car". Excitation tests have been performed, and the results have shown that the non-structural members, as well as the main (outer) body structures, have largely affected the natural frequencies, vibration shapes and response accelerations of the carbody. It is also discussed, aiming at reducing additional mass to the carbody, how the vibration characteristics change according to the number of attached inner ceiling frames.

キーワード：車体剛性，曲げ振動，乗り心地，内部骨組，固有振動モード

Key Words：Rigidity of carbody, Bending Vibration, Ride comfort, Inner frame, Natural mode of vibration

1. はじめに

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、製造工程の省力化などに貢献しているが、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⁾。このような振動特性を有することは、直接的に走行時の乗り心地悪化につながるわけではないが、振動低減策を検討するうえでは、問題が複雑になるなど不都合な点もあり、できるだけ車体が一本の「はり」として振動する特性に近づけることが望ましい。

車体の振動特性に最も影響を与えているのは、強度を主に担う「外部構体」の構造であり、たとえば、面外変形を抑制するように車体各面のパネルとしての剛性を向上するなど、構体設計を変更すれば、振動特性も変化すると予想される。しかしながら、構体設計は強度・剛性に関する要求のほか、「つくりやすさ」(コスト、納期短縮、標準化など)といった製造面からの要求等にも応える必要があり、現状からの大幅な変更は多大な労力をともない、少なくとも短・中期的には現実的とは言えない。

そこで、筆者らは、従来は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。そのために、「剛性試験車体」と呼ばれる試験車体を設計・製作し、構体荷重試験、車両試験台加振試験を実

施した。その結果、強度部材としてはカウントされていない「内部骨組」を補強、もしくは追加することによって、車体剛性が向上し、振動特性をはりに近づけることが可能であることを示した³⁾。

一方、既報³⁾で検討した内部骨組は試験的要素が強く、質量増や高重心につながるなどの課題があり、実用化をめざすにあたっては、補強の効果をできる限り維持しつつ、質量増を抑制することが不可欠である。本報告ではこのような課題を踏まえ、これまでに特性を調査した内部骨組のうち、特に効果が高かった「天井骨組補強」に着目し、取付本数と振動特性の関係を調査することにより、軽量化への見通しを検討したので、その結果を報告する。

2. 剛性試験車体の概要

剛性試験車体(図1)の外部構体は、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

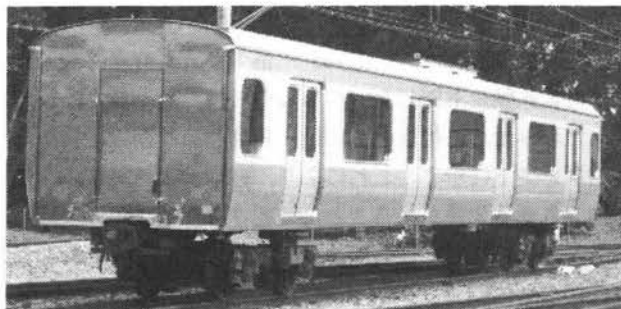


図1 剛性試験車体の外観

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	—

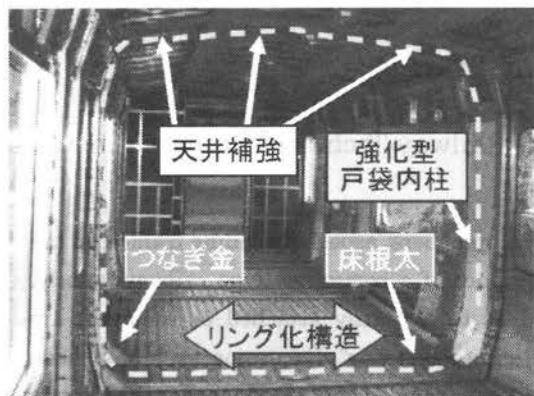


図 2 【R4】補強条件の車内状況

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。そのため、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相当曲げ剛性、相当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、補強条件の車体は通常条件と比較して等価曲げ剛性が約 7.2%、等価ねじり剛性が 9.1%向上し、構体条件との比較ではそれぞれ約 13、17%の上昇となった。

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	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	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

(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た。紙面の都合上【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。

(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、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、戸袋内柱が側の面外変形を抑制した効果のほか、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。

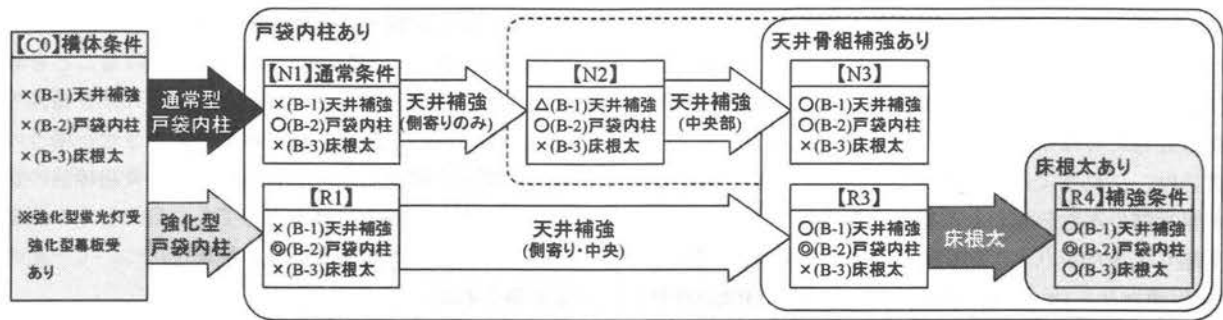


図3 加振試験時の車体条件

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



図5 【R3】条件のS-11モード

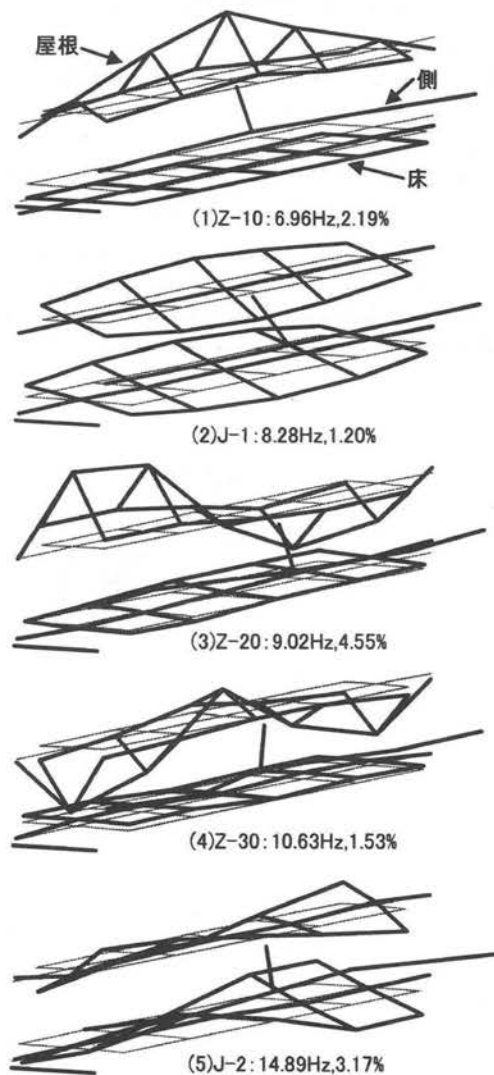


図4 【C0】構体条件の固有振動モード

(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)。条件【N2】は天井骨組補強のうち、まくらぎ方向の側寄り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、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。

(4) 床根太の影響

【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。

(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. 軽量化をめざした検討

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に近づくことが、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

きいほか、天井部への部材追加は高重心化にもつながる。したがって、今後実用化をめざすにあたっては、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が不可欠であると考えられる。

筆者らは、これまでに有限要素法(FEM)モデルを用いて天井骨組補強の本数を減らした場合の振動特性に関する検討を実施してきたが³⁾、ここではその結果を参考に、【R1】(天井骨組補強なし)と【R3】(16組取付、質量約510kg)の中間的な条件として、図6の車体平面図に示す【R3a】(6組、約190kg)、【R3b】(6組、約190kg)、【R3c】(12組、約380kg)の3条件について、追加で加振試験を実施した。【R3c】条件は【R3】から、効果が小さいと考えられる車端4組を除いたものである。【R3a】、【R3b】はそれからさらに本数を半減したものであり、本数は同じであるが、前者は戸袋の戸先寄(ドア開口部に近い側)、後者は戸尻寄(遠い側)を残した条件である。

それぞれの条件で得られた測定データから振動モード解析を実施して求めた固有振動数を表4に示す。本数の増加とともに、概ね固有振動数が増加する傾向が認められるが、(1)Z-10またはS-11モードについては12組、16組ではほぼ同じ値を示しており、効果が飽和していることがわかる。また、(4)J-1モードは0組と6組の差は比較的大きいが、6組と12、16組の差は小さい。また、(5)J-2モードは、全体として固有振動数の変化が小さいこともわかる。同じ本数である【R3a】と【R3b】については、そのほかのモードも含めて大きな差異は見られず、ほぼ同様の効果が得られた。

次に、加振試験時に図6の赤●印の位置(前位台車直上)で計測した加速度からパワースペクトル密度(PSD)を求めた結果を、【R1】、【R3b】、【R3c】条件について図7に示す。なお、図示はしていないが、【R3a】条件は同じ補強本数の【R3b】とほぼ同じ結果であった。天井骨組補強を取付けない【R1】条件と比較して、【R3b】および【R3c】はいずれも卓越したピーク数が減少しており、振動低減のためには、主に表4のモード(1)に対応する11Hz付近のピークのみをターゲットとすればよいことがわかる。【R3b】と【R3c】は、同モードの固有振動数が若干異なるため、【R3c】の方がピークが高周波側に出現しているが、PSDの形状(山谷の様子、ピークの鋭さ等)は類似している。

以上より、固有振動数だけを評価すると、天井骨組補強が多く取付けた【R3】もしくは【R3c】が優れているが、PSD形状から判断すると、【R3】に対して約60%軽量化した【R3b】でも今回の目的の一つである、車体を「はり」に近づける効果が見込めることが確認できた。したがって、質量増と効果のバランスを考えると、【R3a】、【R3b】に優位性が認められる場合もあると考えられる。

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を示した。また、補強部材で構成したリング化構造のうち、

特に天井骨組補強が、車体各面の独立変形を抑制し、車体が一本のはりとして振動する傾向に近づけることを確認した。次に、実用化をめざすにあたって、天井骨組補強の軽量化に関する検討を行い、補強本数を減少させた場合の振動特性の変化を調査した。その結果、天井骨組補強の質量を約500kgから200kgに減少させても、目的とする振動特性に近づけることが可能であり、軽量化について一定の見通しが得られた。

今後は、既存の部品を有効活用して、今回と同様の効果を得る方法を検討するなど、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。



【R1】:なし、【R3a】:6組、【R3b】:6組、【R3c】:12組、【R3】全16組

図6 天井骨組補強取付位置

表4 天井骨組補強本数による固有振動数の比較

条件 モード	R1	R3a	R3b	R3c	R3
(1) Z-10/S-11	9.56	10.72	10.75	11.30	11.28
(2) Z-20/A-21	12.07	14.83	14.90	15.96	16.76
(3) Z-30/A-31	13.29	16.21	16.07	16.61	17.78
(4) J-1	8.39	8.70	8.70	8.79	8.88
(5) J-2	14.22	14.50	14.39	14.26	14.36
補強組数	0	6	6	12	16

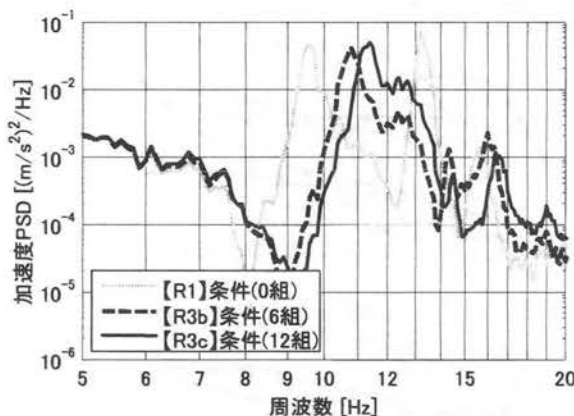


図7 天井骨組補強本数による加速度PSDの比較

参考文献

- 1) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 最近の鉄道車体の固有振動モード特性, J-Rail2002 講演論文集, (2002), pp451-454.
- 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, (2007), pp143-146.
- 3) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎, 非構造部材を活用した鉄道車両の車体剛性向上手法の検討, D&D2008 CD-ROM 講演論文集, (2008), 講演番号 468.