

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

乗客による制振効果をヒントに 車体の曲げ振動を低減する

車両設計において乗客は車体の質量に対する増加分として扱われるのが一般的ですが、むしろ車体の振動を低減する制振効果が大きいことが分かってきました。したがって、この効果を適切に模擬することができれば、従来にない制振デバイスを実現できる可能性があります。そのような観点に基づく最近の検討事例から、高減衰材料による床下機器の弾性支持と変形する粘弾性体による制振について紹介します。



富岡 隆弘
Takahiro Tomioka
車両構造技術研究部
車両振動研究室
室長
[専門分野] 機械力学、
振動工学、車体弾性振
動、車体構造

はじめに

鉄道車両の乗り心地に車体の上下方向の曲げ振動（弾性振動またはびびり振動などとも呼ばれます）が大きく影響しており、新幹線などの優等列車だけでなく通勤・近郊形車両でもその低減が求められるようになってきました。これまで様々な低減策が提案されていますが、いまだ「決定版」といえる方策がなく、状況に応じた個別の対策が行われているのが実状です¹⁾。

ところで、乗客が車体曲げ振動に対して大きな振動低減効果を持つことが示されています²⁾。そのため、この効果を適切に模擬することができれば、従来にない有効な制振デバイスとなる可能性があります。

車体曲げ振動に対する乗客の影響

「乗客が車体曲げ振動に対して大きな振動低減（制振）効果を持つ」といきなり書きましたが、一体どういうことか、ここで少し説明したいと思います。詳細は文献²⁾をご覧ください。

まず、車体曲げ振動についてお話しします。鉄道車両の車体に限らず全て

の構造物は力を受けるとわずかに変形し、もとに戻ろうとするばねのような性質（弾性）を持っているため、これによる振動（弾性振動）を生じます。この変形が曲げによる場合を曲げ振動とよびます。すなわち曲げ振動は弾性振動の一種です（ほかにもねじり振動も弾性振動の一種です）。

車体曲げ振動は、車体の構造と質量によって決まる特定の振動数で顕著になり、その際の振動形状も特定の形になることが知られています。その特定の振動数を固有振動数といい、固有振動数とそれに対応した振動形状の組を固有振動モード（あるいは単にモード）といいます。車体曲げ振動の固有振動モードは無数にあり、固有振動数の低い順に1次、2次、…と呼びますが、通常は低次のいくつかの固有振動モードが問題となります。一般に、固有振動数は車体の剛性（変形しにくさ）と質量の間に次のような関係があります。

$$\text{固有振動数} \propto \sqrt{\text{剛性} / \text{質量}}$$

すなわち、固有振動数は剛性の平方根に比例し、質量の平方根に反比例しま



図1 車両試験台における試験車両の加振試験

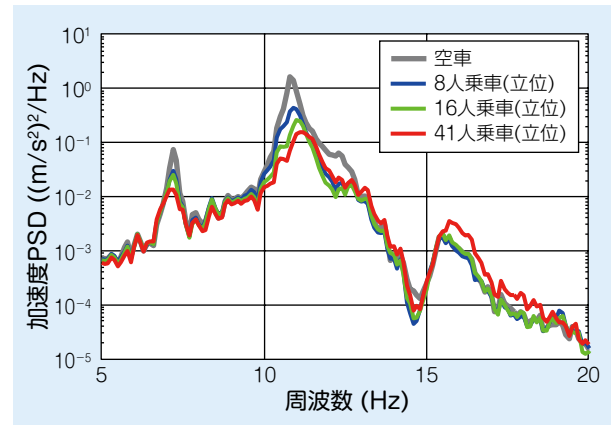


図2 乗車人数による車体振動の変化
(車体中央付近のロングシート直下の床面における
振動加速度パワーの周波数に対する分布)

す。この式から分かるように、車体の剛性が同じなら質量が増えると固有振動数は低くなります。

それでは実際に乗客が乗車すると車体の曲げ振動はどのように変わのでしょうか。これを調べるため、鉄道総研の車両試験台において加振試験を実施しました(図1)。対象車両は鉄道総研保有の試験車両で、車体は広く営業に使われている通勤形車両と同等の構造のステンレス鋼製です。床材や内装材は施工され、腰掛や荷棚などの基本的な車内設備は設置されていますが、空調などの電機品は省略されています。この車両に8人から41人が乗車した場合の車体床面の振動加速度を測定しました。車体曲げ振動が顕著に生じるように、加振条件は車輪全軸を同時に上下に加振する4軸同相加振としました。

図2に床中央の側寄り位置(ロングシート下)における加速度パワースペクトル密度(加速度PSD)を示します。加速度PSDは振動加速度のパワー(強さ)を周波数に対して表示したもので、縦軸方向にグラフの値が大きいほどその周波数の振動加速度が大きいことを表します。空車の場合の7.3Hz付近および11Hz付近に見られる顕著なピークがそれぞれ異なる曲げ振動モードに対応しています。乗車人数の増加

に伴い、これらのピークの高さがともに低下していることが分かります。一方、ピーク周波数(各振動モードの固有振動数に対応)は乗車人数によらずほぼ一定か、若干高周波数側にシフトする傾向が認められます。前述した関係式によれば、乗客の影響を車体の質量増加と考えた場合、乗車人数とともにピーク周波数は低くなるはずですから、この結果はその式では説明ができません。また、乗車人数とともにピーク高さが低くなり振動低減効果が大きくなること、2つのピークがともに小さくなっていること、なども分かります。

以上より、車体曲げ振動に対する乗客の影響は、車体質量が増える効果ではなく車体の振動を低減する効果(制振効果)が大きいこと、複数の曲げ振動モードに対して制振効果があること、そして比較的少人数の乗車でも制振効果があること、などが示されました。したがってこの効果をうまく活用できれば、軽量で有効な制振デバイスを実現できる可能性があります。

乗客を模擬した制振の実現方法

乗客は車体曲げ振動に対し低減効果が大きいことが示されたため、この効果を模擬した制振デバイスの実現を目

指した検討を行っています。乗客による制振効果を模擬するための方針として、以下のようなものが考えられます。

(1) 高減衰部材で質量を弾性支持

詳細は省略しますが、乗客による影響は減衰能が大きい1自由度系(1つの質量をばねと減衰要素で支持した系)で定性的に模擬できることがわかっています。このことから、ある程度の質量を高減衰材料を使って弾性支持することが車体曲げ振動の制振に有効である可能性が示唆されます。なお、これまでのさまざまな検討によると、着座した人体各部の上下応答の主な共振(固有振動数に対応)は4~6Hzに存在するとされますが、上述のように乗客は少なくとも7~13Hz程度の固有振動数を持つ複数の車体曲げ振動に対し低減効果があります。したがって、高減衰部材で弾性支持する質量の固有振動数が、制振対象の車体曲げ振動の固有振動数より低い値となるように支持部材を設計することが有効である可能性があります。

(2) 多方向に変形する粘弾性体の活用

これは、上下方向の加振に対して人体は前後左右にも振動すること、人体は粘弾性体と考えることができることから類推されるものです。

鉄道総研ではこれらの方針に基づい



図3 ダミー床下機器の設置状況と製作した制振機器吊り

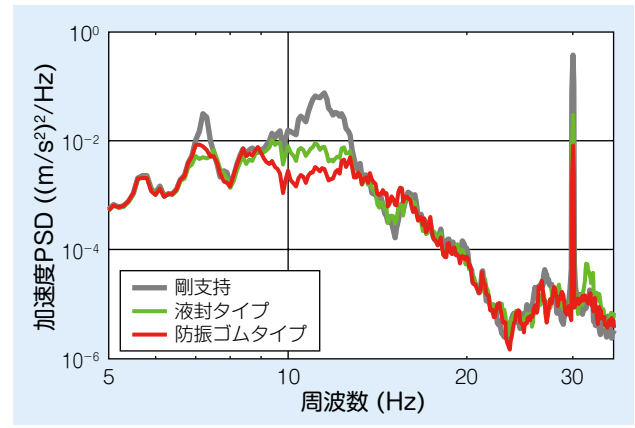


図4 制振機器吊りによる車体振動の変化
(車体中央付近のロングシート直下の床面での測定結果)

て検討を行っています。以下では、上述の試験車両を対象に車両試験台において行った基礎試験結果を(1)(2)について1例ずつ紹介します。

高減衰部材を用いた質量の弾性支持による制振—制振機器吊り

車体に比べて高減衰の材料を用い、対象とする車体弾性振動の固有振動数と同程度か若干低い固有振動数になるように床下機器を支持する「制振機器吊り」の開発を行いました。これにより通常の動吸振器(☞参照)で必要となる煩雑な固有振動数や減衰特性の調整なしに、広い周波数範囲で車体の振動を低減できる可能性があります。

今回の供試車両(図1)は床下機器が省略されているため、床下機器を模擬したダミーを床下に設置し、それを弾性支持することとしました(図3)。ダミー機器は、鉄の厚板を重ねた可動部(質量は1台あたり500kg)と、車体に

固定され可動部を弾性支持する機器枠からなり、今回は2台のダミー機器を車体中央付近の横はりに左右に振り分けて設置しました。なおダミー機器を除く車体質量は11.5tです。

ダミー機器可動部を支持する制振機器吊りとして、液封タイプと防振ゴムタイプの2種類を製作しました(図3)。500kgの質量を4箇所で支持した場合のダミー機器の固有振動数はいずれも8Hzとばね定数は同じですが、減衰特性を変えています(液封タイプは防振ゴムタイプより減衰大)。

このダミー機器を設置した試験車両を鉄道総研の車両試験台において加振して、車体曲げ振動低減効果を確認する試験を実施しました。加振条件は図2と同様の4軸同相加振とし、コンプレッサーや空調機などのように床下機器自身が発生する振動を模擬するため、片方のダミー機器に起振機を設置して、30Hzの正弦波による加振も同時に行いました。ダミー機器の支持条

件は2種類の制振機器吊りによる弾性支持のほか、通常の設定状況を模擬した剛支持(機器枠と可動側をボルトで結合)の3条件としました。

図4に、床中央の側寄り位置(ロングシート下)における加速度PSDを示します。剛支持の場合は、7.5Hz付近と11Hz付近に明瞭なピークが認められますが、制振機器吊りを適用してダミー機器を高減衰弾性支持することで、この2つのピークが同時に低減する傾向が確認できます。また、30Hzの鋭いピークは床下機器が発生する振動が車体に伝達したことによるものですが、このピークも制振機器吊りの適用により低下しています。

このように制振機器吊りによる複数の車体曲げ振動の低減効果と床下機器が発生する振動の車体への伝搬の抑制効果が示されました。なお、床下機器(可動側)の振動は制振機器吊り適用により大きく悪化しないことも確認しています(図4の加振条件では、ダミー機器可動側の振動は、液封タイプ適用の場合約35%低減、防振ゴムタイプ適用の場合約10%増大)。

多方向に変形する粘弾性体の活用

つぎに、振動により多方向に変形する柔軟タンクに液体などを充填して車

☞ 動吸振器

制振対象(主系)の振動を低減する目的で取り付ける付加的な振動系(質量をばねと減衰要素で支持したもの)を動吸振器といいます。動吸振器が振動することで主系の振動エネルギーが減少し、制振効果が得られます。効果的な制振のためには、動吸振器の固有振動数を主系の固有振動数に近づけるよう支持ばねの強さを調節するほか、減衰の大きさも調整が必要です。鉄道車両の床下機器を用いて動吸振器を構成する提案は過去にもありますが、支持部材のばねや減衰定数の細かい調整が必要なため、実用化事例は報告されていません。



図5 柔軟タンクの積載状況 (20L × 48個)

体床面に積載することで乗客による制振効果を模擬する試験を実施しました。ここでは1辺が約30cmの立方体状のポリエチレン製柔軟タンク(容量20L)に固形ジェル(流動性はほとんどなく、こんにやくに近い特性。タンクは自立可能)、吸水性樹脂(粘性は水よりかなり大きい流動性あり。タンクは自立可能)、水(タンクは自立できないため段ボール箱に入れて積載)の3種類の流体やジェル(ここでは媒質と呼ぶことにします)を充填して用いました。媒質を充填した柔軟タンクの質量は1個20kg(段ボールを含む場合は1個21kg)です。この柔軟タンク48個を上記の試験車両の床中央付近に積載し、車両試験台において加振試験を行いました。試験時の車内の状況を図5に示します。

図6に床中央の側寄り位置(ロングシート下)での加速度PSDを示します。柔軟タンクを積載すると、乗客乗車と同様に7.3Hz付近と11Hz付近のピークが同時に低減する傾向が認められます。

特定の測定点だけでなく床全体の状況を見るため、床面21箇所測定された加速度実効値の合計を空車の場合を100%として表したものを図7に示します。この図から、16人が乗車すると(立位、合計質量1050kg)床面全体の振動が30%程度低減することが分

かりますが、媒質を充填した柔軟タンク積載によりそれに近い制振効果が得られること、用いる媒質の種類による差異は少ないことなどが確認できました。したがって、取り扱いの容易な水による制振の可能性が示されたと言えます。

おわりに

乗客による車体曲げ振動への影響をヒントにした新しい制振手法を紹介しました。いずれも現時点では基礎検討段階ですが、制振機器吊りに関しては、床下機器の代わりに床上に設置した鉄板を防振ゴムタイプの部材で支持して走行試験を実施し、車体曲げ振動の低減効果を確認しています。また、多方向に変形する粘弾性体の活用についても、より実用的な形状を検討中です。

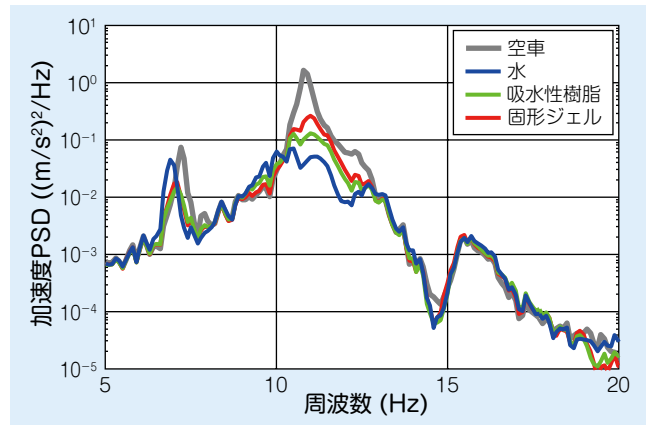


図6 媒質充填柔軟タンク積載による車体振動の変化(車体中央付近のロングシート直下の床面での測定結果)

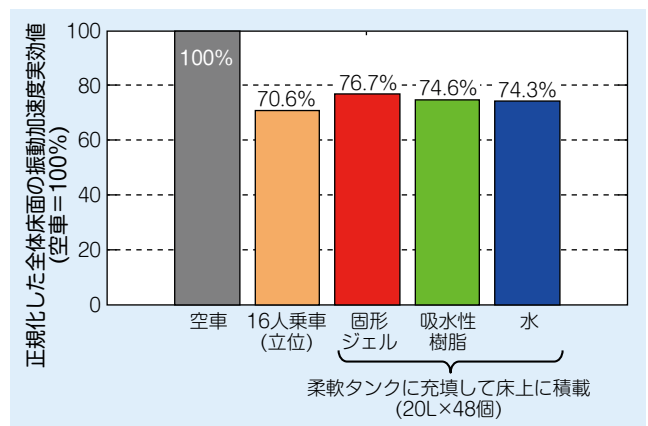


図7 床面全体の振動加速度実効値の変化(床面21箇所の加速度実効値の合計。空車=100%)

乗客による制振効果は車種によらず、また、複数の車体弾性振動モードに対して見られることから、これを模擬した制振デバイスの開発は工学的にも重要性が高いテーマであると考えています。今後も引き続き検討を進め、より快適な鉄道車両の実現に努めて行きたいと思います。[RRR]

文献

- 1) 富岡隆弘：鉄道車両の車体曲げ振動の解析と低減技術，車両技術，No.231，pp.96-106，2006
- 2) 富岡隆弘：旅客の乗車で車体振動が変わる，RRR，Vol.66，No.7，pp.18-21，2009.7