

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

鉄道分野における振動の制御と活用

鉄道分野における振動現象には、車両の高速化・乗り心地向上、沿線の振動・騒音の緩和などのために克服すべき課題が多く、これまで数多くの技術開発が行われています。一方で、振動現象をうまく利用することにより、鉄道車両や構造物の状態監視や異常検知を行うなどの技術開発も行われており、今後の展開が期待されています。ここでは、鉄道に関するさまざまな分野で進めている振動の対策技術や振動を活用した診断技術などを紹介します。



長倉 清
Kiyoshi Nagakura
環境工学研究部
部長
【専門分野】音響工学

はじめに

鉄道車両は地上側の設備（軌道や架線など）と接触しながら走行しているため、車両－地上設備間の相互作用により、双方に力が働きます。また、車両が高速で走行する場合は、車両が空気から受ける力の影響も大きくなります。これらの作用力は、車両や地上設備、さらには鉄道沿線の地盤や建物にまで振動問題を引き起こす場合があります、その対策のために数多くの技術開発が行われています。

一方、鉄道車両や鉄道設備における状態異常は振動特性の変化として現れる場合があります、振動現象をうまく利用することにより、鉄道車両や構造物の状態監視や異常検知を行うための技術開発も行われています。

振動を制御する

鉄道において問題となる振動現象には、対象物ごとに大きく分けて、(1) 振動乗り心地などの車両に関わる現象、(2) 走行車両と高架橋などの共振現象や架線の異常振動などの地上側の鉄道設備に関わる現象、(3) 沿線の地盤振動、建物振動など沿線環境に関わる現象があげられます。

一方、振動を制御する対策としては、振動を引き起こす力を低減する方法、弾性支持などの方法により振動の伝達段階で減衰させる方法、対象物の剛性を上げて振動しにくくする方法などが一般に行われており、鉄道分野においてもこれらの方法による対策が数多く採用されています。

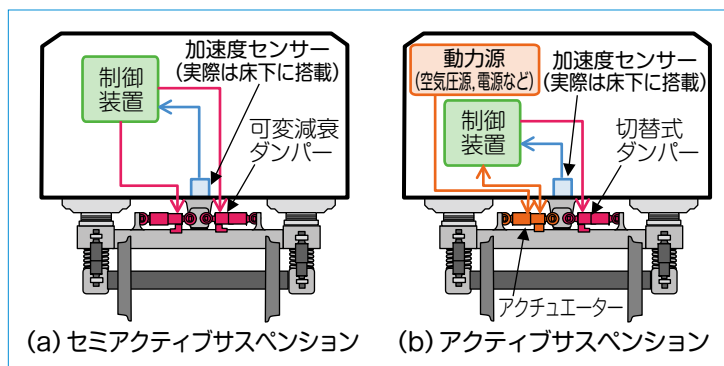


図1 左右の制振制御システムの構成例

以下では、鉄道における代表的な振動問題として、車両の乗り心地に関わる振動と沿線の地盤振動を採り上げ、その対策技術について紹介します。

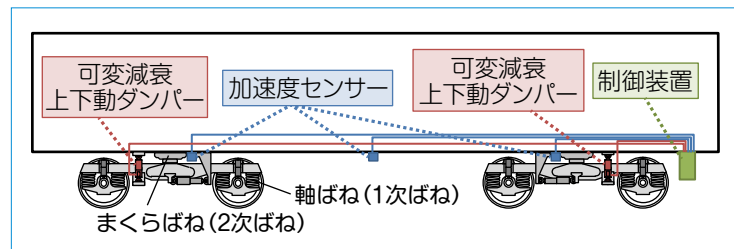


図2 上下制振制御システムの構成

車両の乗り心地に関わる振動

(1) 左右振動の対策

車両の振動は車内快適性に大きな影響を与えるため、その低減は常に大きな課題の一つとなっています。車両の振動は、軌道の不整などにより台車に加振され、その振動が車体に伝わることによって生じるほか、高速走行時には空気力により車体が直接加振されます。新幹線の速度向上にあたり、とくにトンネル内において車体に大きな空気力が作用し、左右方向の振動が増加して乗り心地が悪化することがわかってきました。台車から車体に伝わる振動については、台車-車体間のばねやダンパーの利きを弱くして台車の振動を車体に伝わりにくくすることが有効ですが、空気力は車体に直接作用するので、これによる振動を抑えるには上記とは逆に台車-車体間の抵抗力を強くしてこの力に対抗する必要があります。この相反する要求を満足させるために開発されたのが、セミアクティブあるいはアクティブサスペンションと呼ばれる振動制御システムです¹⁾。

これらのシステムでは、車体に搭載した加速度センサーで測定された車体振動から制振に必要な力を制御装置で計算し、セミアクティブ方式では可変減衰ダンパーで、アクティブ方式ではアクチュエーターで力を発生させることにより振動を制御します(図1)。これらのシステムは、現在の新幹線車両で幅広く採用されています。

(2) 上下振動の対策

近年、注目されている観光特急列車やクルーズトレインなどと呼ばれる列車は、走行ルートがローカル線に至る

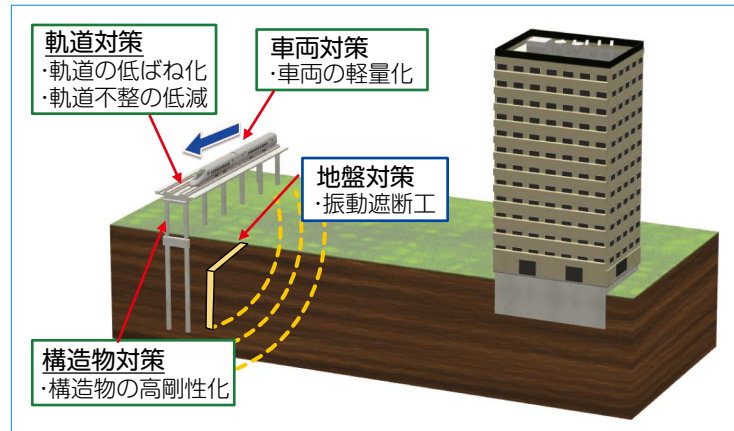


図3 地盤振動の対策

こともあり、レールの継目を通過するときの上下振動が問題となる場合があります。この上下振動を車両側で低減するために、車体と台車の間に設けられたまくらばねと並列に可変減衰ダンパーを取り付け、車体に取り付けた加速度センサーからの情報に基づいてこの力を制御するシステムが開発され、営業車両に採用されています(図2)¹⁾。

そのほか、車体の曲げ振動に起因する上下方向の振動を低減するための試みとして、従来は剛性に関与しない部品と考えられていた吊手棒で車体の左右側面と天井をつないで車体の剛性を高めることにより変形を抑制する手法が提案され、振動乗り心地を向上させる効果が確認されています²⁾。

沿線の地盤振動

車両が軌道上を走行すると、軸重の移動や車輪・レール凹凸に起因する変動力がレールに作用します。地盤振動は、その変動力が軌道、構造物を介して地盤に伝わることにより生じる現象であり、沿線の環境問題になることが

あります。地盤振動の対策は、車両、軌道、構造物および地盤での対策に分類されます(図3)³⁾。

(1) 車両での対策

鉄道車両は車体や台車などがばねでつながった構造で、それ自体が複雑な振動系を構成していますが、これまでの研究により、沿線の地盤振動の大きさに最も影響を与えるのは車両全体の質量であることがわかっています。そのため、車両の軽量化は有効な地盤振動対策であるといえます。現状の新幹線車両はおおむね限界に近いところまで軽量化されており、その意味ではほぼ対策済みといえます。

(2) 軌道での対策

軌道での対策としては、軌道を支える部分のばね定数を小さくする方法(軌道の低ばね化)が広く行われています。軌道の低ばね化工法として主に実施されているのは、有道床軌道区間を対象とした有道床弾性まくらぎ、バラストマットや、主にスラブ軌道区間を対象とした低ばね軌道パッドなどで(図4)。新設線の場合には、これらの

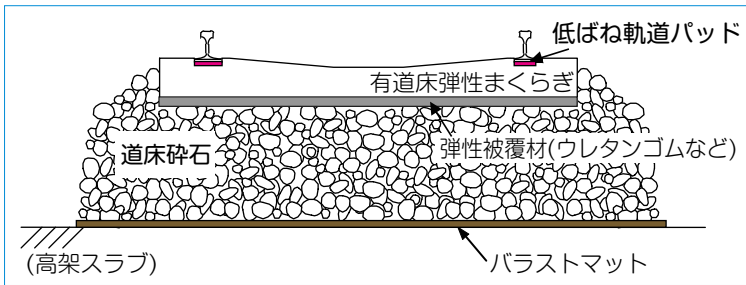


図4 軌道の低ばね化(有道床軌道)

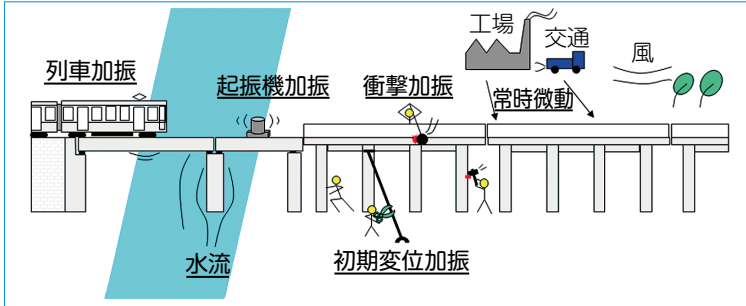


図6 構造物振動の加振源

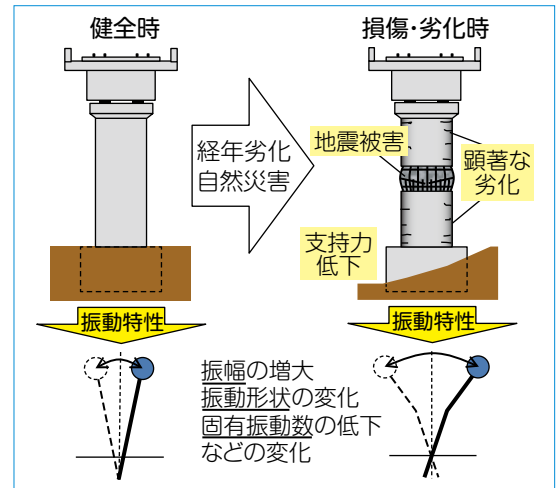


図5 変状にともなう構造物の振動特性の変化

工法のほか、軌道構造自体を防振直結軌道などの防振軌道とすることもでき、地下鉄などでは広く用いられています。

また、地盤振動を引き起こす加振力を低減するためには、軌道不整の低減が有効な対策となります。

(3) 構造物での対策

構造物を部分的に補強するなどの工法により、構造物の剛性を上げることによって振動低減を試みた例がありますが、施工事例が少なく、低減効果を定量的に評価するには至っていません。

(4) 地盤での対策

地盤での対策としては、鉄道構造物と沿線の建物との間に地中壁などを設けて振動を遮断する「振動遮断工」が検討されており、新幹線沿線で実施された鋼矢板、コンクリート壁、発泡ウレタン壁などを用いた対策試験において効果が確認されています。

振動を活用する

振動を用いた診断はさまざまな分野で用いられており、鉄道分野においても、構造物や車両の部品などの診断などに広く活用されています。

振動を活用した診断方法の一つとして、対象となる物体の振動特性の変化

(固有振動数の変化など)により、状態を診断する方法があげられます。この方法では、対象物の正常な状態での振動特性を把握しておき、測定した振動特性と比較することにより、異常の有無や程度を評価します。

また、鉄道においては、車両と鉄道構造物は、車輪とレールあるいはパンタグラフと架線において接触しながら移動しているため、両者の接触状態の変動はそれぞれの振動に影響を与えます。したがって、接触しながら移動する対象物の振動を測定することにより、それらの状態を推定することが可能です。検測車による軌道や架線の検測には、これらの考え方に基づいた振動測定による診断技術が多く活用されています。

以下では、振動を活用した状態監視や診断技術の事例を紹介します。

構造物の診断

鉄道の構造物の振動特性は、地震による損傷、顕著な劣化、河川増水などによる支持力低下などによって変化します(図5)。そこで、構造物の振動を測定し、測定した振動データの振幅や固有振動数などを健全時の値や設計基

準値または統計的／解析的に算出した基準値と比較することによって、構造物の損傷や劣化の程度を評価することができます。

構造物に振動を与える加振源としては、走行列車による加振、重錘打撃などを用いた人為的加振、常時微動(風などの自然の外力、交通機関や工場などの人工的外力による微小な振動)などがあげられます(図6)。また、振動の測定方法としては、加速度センサーを構造物に取り付ける方法が広く行われていますが、最近ではLDV(レーザードップラー速度計)を応用した非接触測定も実施されています⁴⁾。

振動を活用した構造物診断技術の例としては、目視による確認が困難な構造物の基礎や流水部に位置する橋脚などの診断があげられます。これらの構造物については、健全度が低下するとその固有振動数が低下することが確認されています。そこで、構造物に重錘などで打撃を加えたときの応答振動あるいは構造物の常時微動をスペクトル解析することによって健全度を判定する手法が行われています⁵⁾。

また、トンネル表面のひび割れなどの欠陥を探るための手法として用いられている打音検査も、発生音を介してトンネル表面の振動特性の変化をとらえていることから、振動を活用した診断方法の一つといえます⁶⁾。

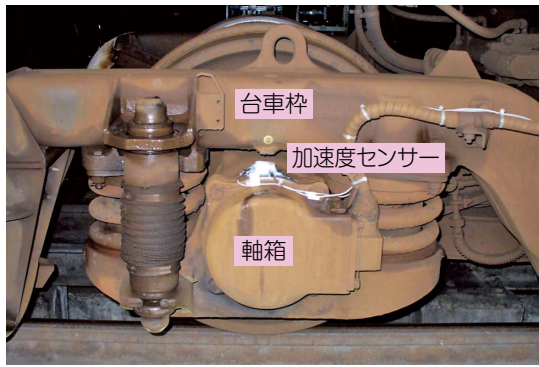


図7 軸箱加速度センサーの取り付け状況

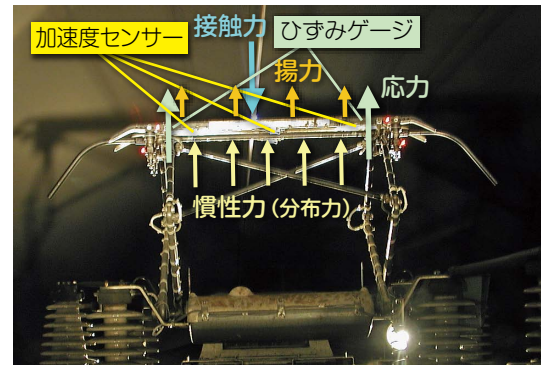


図8 接触力測定の考え方

車両部品の診断

車両の診断における振動の活用方法としては、走行時の車両の振動を常時監視する方法、衝撃加振試験などにより振動特性の変化を測定する方法などがあげられます。

前者の例としては、床下に取り付けた加速度センサーで得られた振動を常時監視して信号処理することにより、軸箱、歯車箱、継手の故障の予兆を早期に検知するシステムが開発され、N700A新幹線電車で採用されています⁷⁾。

また、気動車のエンジンや回転軸、電車のモーター軸受などの異常検知を行う技術として、振動測定と機械学習を組み合わせた状態監視システムの研究が進められています⁸⁾。

後者の例としては、台車が加速・減速する力を車体に伝える一本リンクと呼ばれる部品において、台車からの衝撃的な力を緩衝するためのゴムの損傷状況を衝撃加振試験により判定する方法などが提案されています⁹⁾。

レール・車輪の状態の診断

車両側の振動からレール状態を診断する方法としては、軸箱に取り付けた加速度センサーを用いた方法が行われています(図7)。軸箱加速度はレール凹凸と高い相関を持つことがわかっており、この測定データを用いてレールに生じた波状摩耗や溶接部の落ち込みなどを検出することができます。また、

営業車の車上での振動・騒音の測定結果から簡易に波状摩耗などの検出が可能な可搬型システムの開発も行われています¹⁰⁾。

地上側の振動から車輪状態を診断する方法としては、高架橋の調整桁に設置した加速度センサーにより車両通過時の振動を測定し、その結果から車輪に生じた局所的な摩耗(偏摩耗)を検出する手法が提案されています¹¹⁾。

パンタグラフの接触力の診断

架線とパンタグラフの間に作用する接触力の大きな変動は、安定した集電の障害要因となります。そこで、パンタグラフ舟体の上下振動加速度の測定が電気検測車などで実施されており、接触力の大きな変動がある箇所の抽出などに活用されています。

また、舟体に設置したひずみゲージで得られる応力と舟体に設置した複数の加速度センサーで得られる慣性力から、接触力を高い精度で測定する手法が開発されています(図8)¹²⁾。

おわりに

鉄道分野における「振動」に着目し、その制御・低減技術や振動を活用した状態監視、異常検知技術などを紹介しました。これらの技術は、計測技術、制御技術、ビッグデータの処理技術、新材料に関する技術などの関連技術の進歩と相まって、ますます進展することが期待されます。今後も広い視点を持って、この分野における研究開発を進めたいと思います。[RRR]

文献

- 1) 菅原能生, 小島崇: 車内の振動を低減する, RRR, Vol.73, No.4, pp.8-11, 2016
- 2) 瀧上唯夫, 富岡隆弘: 吊手棒で車内をつないで乗り心地を向上する, RRR, Vol.72, No.5, pp.20-23, 2015
- 3) 横山秀史: 鉄道沿線の地盤振動を低減する: RRR, Vol.69, No.9, pp.12-15, 2012
- 4) 上半文昭: 構造物を遠隔非接触で診断する, RRR, Vol.74, No.2, pp.24-27, 2017
- 5) 峯岸邦行: インパクト (IMPACT), RRR, Vol.64, No.6, pp.40-41, 2007
- 6) 津野究, 西金佑一郎: トンネルの健全性を診断する, RRR, Vol.74, No.2, pp.12-15, 2017
- 7) 大庭拓也: 台車振動検知システムの開発, JR東海技報, Vol.13, pp.25-26, 2015
- 8) 近藤総: 振動の音色で機器の異常を検知する, RRR, Vol.74, No.10, pp.16-19, 2017
- 9) 間々田祥吾, 佐藤大悟, 鈴木実, 渡辺信行, 朝比奈峰之: 一本リンクを台車から外さずにゴムの損傷を判定する, RRR, Vol.70, No.7, pp.12-15, 2013
- 10) 田中博文, 芳賀昭弘: 車上からレール波状摩耗をとらえる, RRR, Vol.68, No.4, pp.10-13, 2011
- 11) 末木健之, 北川敏樹: 構造物の振動で車輪偏摩耗を検出する, RRR, Vol.74, No.10, pp.28-31, 2017
- 12) 池田充: 架線・パンタグラフ系の挙動を探る, RRR, Vol.65, No.8, pp.22-25, 2008