

コイルばね防振軌道の電車走行時振動に関する検討

鈴木 健 司
(技術研究所)
渡 辺 弘 之
(技術研究所)

§ 1. はじめに

鉄道振動問題、特に固体伝搬音の問題は、鉄道の近傍や高架下、地下鉄の上などに建つ建物の設計者および使用者にとって最も重要な問題の一つであり、現在、鉄道事業者およびその研究機関、建設会社や音響コンサルタント会社等で、その発生源や伝搬経路、対策方法について研究開発がなされている。対策方法については、建屋や建物内床・壁・天井などの防振工法をはじめ、地盤伝搬振動を遮断する防振溝・防振地下壁工法、発生源で振動を低減する弾性マクラギ、防振マクラギ、低ばねレール締結装置、防振スラブ軌道、フローティングスラブ軌道などが既の実施されており、また現在も研究開発が進められている。

当社においても、鉄道振動の加振力や伝搬特性などの実測および分析を行うとともに、ドイツの防振装置メーカーであるGERB Vibration Control Systems社と共同で、軌道一体構造物を対象とした振動対策構工法である防振軌道システム；「コイルばねフローティングスラブ軌道システム」について、地震応答などの各種振動解析やシステムの基本特性確認のための振動測定など各種の検討を行ってきた。

本論文では、GERB社がドイツで施工した市電の防振軌道において実施した振動測定の結果を示し、コイルばねフローティングスラブ軌道システムの振動低減効果などについて明らかにしている。

§ 2. 防振軌道システム概要

コイルばねフローティングスラブ軌道システムは図-1、図-2に示すように、コイルばねを用いて軌道スラブを弾性支持するマス・スプリング・シ

テム形式の防振軌道で、これまで日本国内で実施されてきたゴム支承を用いたフローティングスラブ軌道と比較して以下のような特長を持っている。

- ・弾性支持要素としてコイルばねを用いているので、ゴム支承のようなばね定数の振幅依存性や温度依存性などがなく（非常に小さく）、ほぼ設計通りのばね-マス系を実現することができる。〔信頼

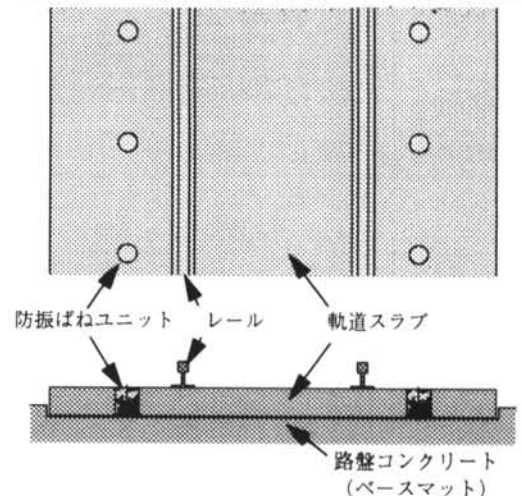


図-1 コイルばねフローティングスラブ軌道システム図

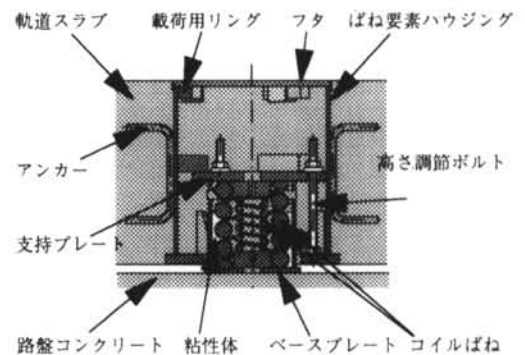


図-2 防振ばねユニット図

性]

- ・弾性支持要素としてコイルばねを用いているので、ゴム支承のようなクリープや経年劣化がなく、半永久的に性能を維持することができる。[耐久性]
- ・水平/鉛直剛性比がゴム支承で1/5~1/10なのに対してコイルばねでは1~1/2程度と、同じ鉛直剛性の支承を考えた場合でも水平剛性をより硬くできるので、同じ鉛直固有振動数で防振支持する場合には、コイルばねの方が列車の加速・制動荷重や車両横荷重などの水平荷重による変形をより小さく抑えることができる。[列車走行安定性]

さらに、図-1、図-2で示したように、弾性支持要素としてコイルばねに減衰要素(粘性体)を内包したユニットを用い、そのユニットを軌道スラブ内に埋め込む形式としていることから、以下のよう

な特長も持っている。

- ・コイルばねを粘性体の中に浸ける形で減衰を持たせているので、コイルばねで問題とされるサージング(コイル自体の共振現象)を抑えることができる。[信頼性]
- ・弾性支持要素が軌道スラブの厚みの中に収まるので、支承の上にスラブを置く従来方式に比べて軌道スラブと基盤との隙間を小さく抑えることができる。特にトンネル内ではスラブ面の高さを低く抑えることによってトンネル断面を小さくすることができる。[経済性]
- ・弾性支持要素であるコイルばねユニットは、軌道スラブの表面に出ているばねユニットの蓋を開けることによって出し入れすることができるので、ばねの点検や取り替えなどに際しても重機使用の

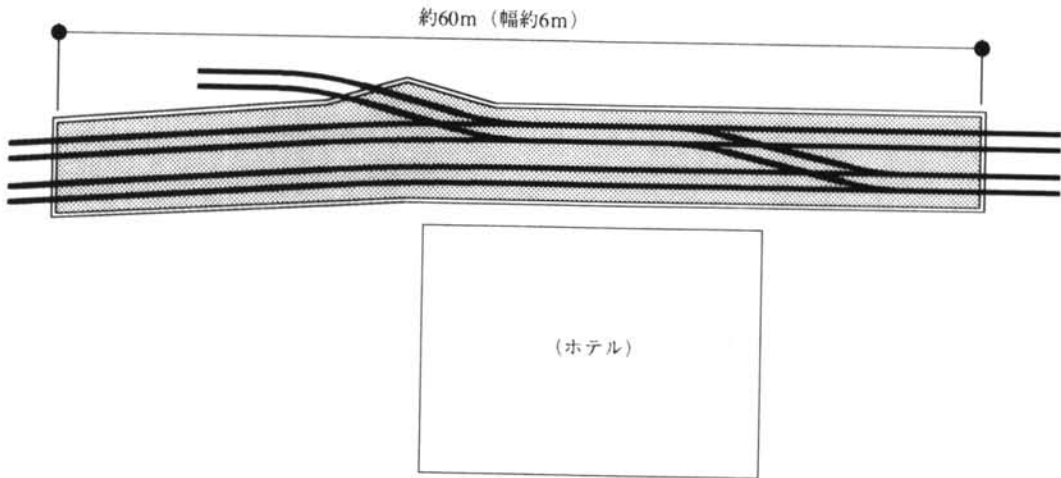


図-3 Bielefeld市電のフローティングスラブ軌道(平面図)

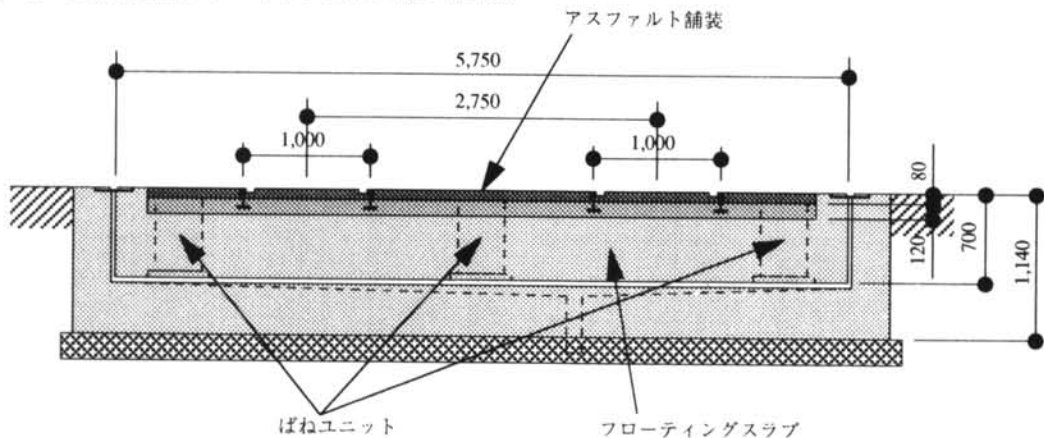


図-4 Bielefeld市電のフローティングスラブ軌道(断面図)

必要がなく手間がかからない。〔保守点検〕

特にサージングについては、コイルばね自体をサージング振動数が高く（400Hz前後）なるように設計しており、防振効果にはほとんど悪影響がないように配慮している。

コイルばねフローティングスラブ軌道の固有振動数は鉛直方向で5~7Hz程度になるように設計される。防振効果については1自由度のばね-マス系の振動伝達率で予測することができる。

§ 3. 測定概要

3.1 測定対象

振動測定は、GERB社がドイツで施工した市電のフローティングスラブ軌道で実施した。

このフローティングスラブ軌道は図-3、図-4に示すような形状で、写真-1に示すように隣接す



写真-1 ドイツの市電のフローティングスラブ軌道

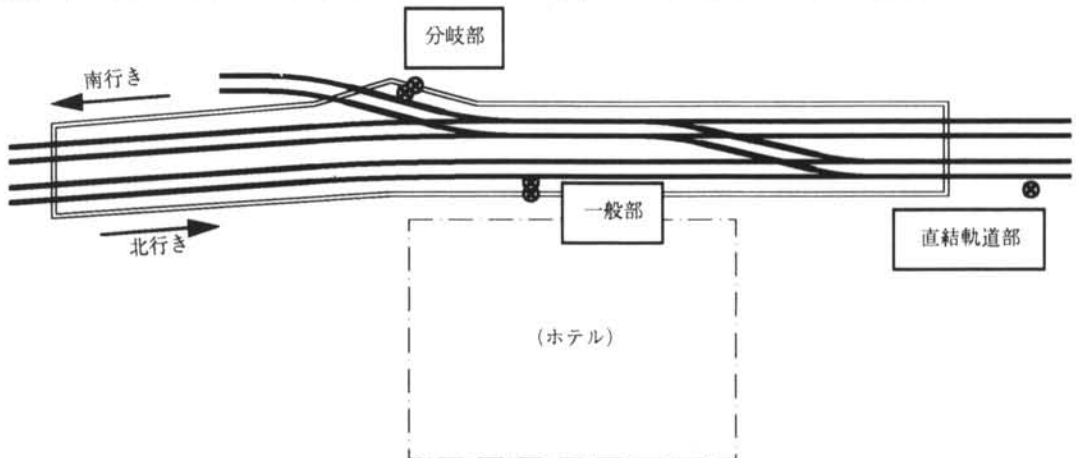


図-6 列車走行時振動測定点（平面図）

るホテルを電車通過時の振動から守るために設けられている。長さ約60m、厚さ70cmの2本の軌道が走る軌道スラブを120台のコイルばねユニットを使って上下約5Hz（減衰約5%）で支持している。水平方向の固有振動数は約4.4Hzである。コイルばねユニットは標準で幅約6mに3列、線路方向1.75m間隔で配置されている。軌道表面はアスファルト舗装されていて車も通れるようになっている。フローティングスラブ軌道の北側はアスファルト舗装された直結軌道になっており、そのさらに北側とフローティングスラブ軌道の南側はバラスト敷の軌道となっている。フローティングスラブ軌道北側のバラスト敷の部分は停留所となっている。

走行する電車は軌間約1mで、図-5に示すように長さ約14mの運転席付き車両前後2両の間に長さ10mの中間車両がはさまる3両連結で、それが2つつながった6両編成になっている。台車は運転席付

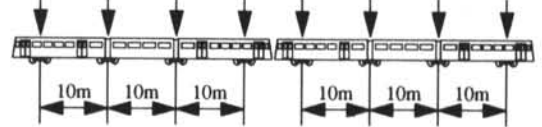


図-5 フローティングスラブ軌道を走る電車

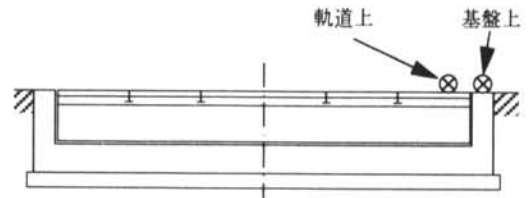


図-7 列車走行時振動測定点（断面図）

き車両の先頭部および中間車両と運転席付き車両の連結部にあり、10m間隔で並んでいる。軸重（車両のみ）は先頭部が約13.5ton、連結部が約12tonとなっている。

3.2 測定項目

測定点は図-6、図-7に示すように、防振軌道上の軌道分岐部（レール継ぎ目で大きな衝撃振動が出る）と一般部（レール継ぎ目がない）について防振スラブ上とその基盤上でそれぞれ上下水平3方向の測定を行った。防振効果算定の際の非防振軌道の基準データとして、防振軌道北側の直結軌道部分で上下水平3成分の測定を行った。測定機器の都合上、各測定地点では防振スラブ上と基盤上を同時に測定したものの、分岐部、一般部、直結軌道部の各測定地点毎にはそれぞれ別々に測定した。各測定地点において南行き、北行き両方向の電車通過時の振動をそれぞれ各方向5～10本ずつについて測定した。

センサーは圧電式加速度ピックアップを用い、サンプリング周波数6kHzでデータレコーダに記録した。各測定地点でのセンサーの設置は、ネジで3方向にセンサーを固定したアクリルブロックを両面テープでスラブ面に貼り付ける方法をとった。写真-2にセンサー設置状況を示す。

§4. 測定結果

振動測定はそれぞれの地点で南北両方向行きの電車について行ったが、ここではそれぞれ測定地点に近い側を通過する電車、すなわち分岐部では南行きの電車、一般部および直結軌道部では北行きの電車の測定結果について検討する。フローティングスラブ軌道のすぐ北側には停留所があるため各地点を通過する電車の走行状況（電車の速度や加減速の程度など）が異なることとなったが、各方向5～10本ずつの通過電車について測定し、それらのデータを平均化して比較することとした。

4.1 加速度波形

図-8に列車通過時の各地点での代表的な鉛直方向の加速度波形を示す。この波形はデータレコーダーの記録から電車通過時振動の波形部分を切り出したものである。

直結軌道部の波形の包絡形状を見ると各台車（計



写真-2 センサー設置状況

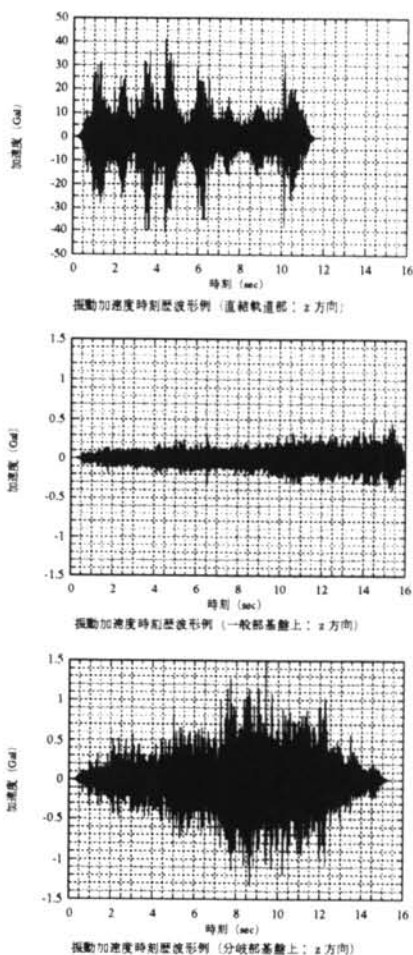


図-8 加速度波形

8台)の通過時に振動が大きくなっている様子がわかる。1～4番目の波形の山が前の3両で、5～8番目の波形の山が後ろの3両になる。2、3番目および6、7番目の山はそれぞれ1、4番目および5、8番目の山より少し小さくなっているが、これは連結部の軸重が運転席部の軸重より軽いためと考えられる。前3両分の4つの山が後ろ3両分の4つの山より大きいのは、測定地点通過後すぐに停留所があるので電車が減速していくためである。このことは山の間隔が次第に広がっていていることから確認できる。

フローティングスラブ軌道一般部の基盤上での波形を見ると、直結軌道部の波形のような台車通過時の山がほとんどみられない。これは、フローティングスラブ軌道が長さ約30mにわたってほぼ一様に弾性支持されていて、電車がスラブ端部から走行して反対側端部で降りてしまうまで、スラブがほぼ一様に揺れていることを示している。すなわち1質点のばね-マス系のような振動となっている。振幅も直結軌道部に比べると1/20以下になっており、ばね-マス系防振軌道が実現されていることがわかる。

分岐部の基盤上での波形を見ると、振幅は一般部

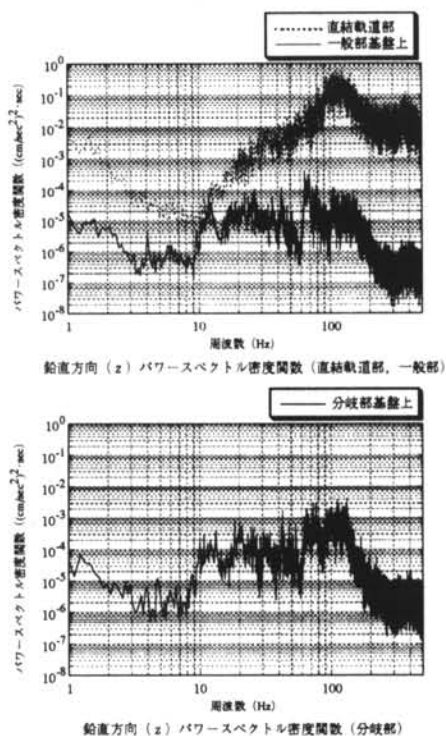


図-9 パワースペクトル密度関数

より大きく、特に後半部分で大きくなっていることがわかる。これは分岐部を車輪が通過する際にレール継ぎ目で衝撃的な力が掛かるため、後半部分が大きいのは直結軌道部とは逆に停留所を出た電車が加速していくためと考えられる。一般部でもスラブ終端部に分岐が位置しているため波形の最後のほうが若干大きくなっているような傾向もみられる。

4.2 パワースペクトル密度関数

図-9に図-8で示した加速度波形のパワースペクトル密度関数を示す。

直結軌道部のスペクトルを見ると100Hz付近でも大きくなっている。鉄道振動は固体音領域では一般にオクターブバンドで31.5Hzあるいは63Hzおよび125Hzの振動数成分が大きいとされているが、この測定結果からもそのような傾向が見られる。

一般部の基盤上のスペクトルを見ると、10～200Hzくらいまではほぼ同程度のレベルになっており、100Hz前後の成分が非常に良く低減されていることがわかる。ただ、60数Hzに山があるように見え、何らかの共振現象が発生していると考えられる。

分岐部の基盤上のスペクトルを見ると全体に一般部の基盤上よりも大きくなっている。両地点の電車走行状態には発車直後の加速状態と停車直前の減速状態(南行きと北行き)という違いがあるので単純に大きさの比較はできないが、ここに示した以外の電車の場合も含めてスペクトルの形状を比べると、11Hz前後と110Hz前後の成分が大きくなる傾向にあり、レール継ぎ目で発生する衝撃振動などの成分がこれらにあたるものと考えられる。

4.3 1/3オクターブバンドスペクトル

図-10に各地点での電車5～10本分の測定データから求めた1/3オクターブバンドの平均スペクトル(0-peakおよびrms)を示す。ただし、平均値を出す際には他に比べてレベルが大きく違う特異なデータは除いて算出している。

1/3オクターブバンドスペクトルを見ると、パワースペクトル密度関数で見られた傾向がよりはっきりとわかる。直結軌道部では100Hzの振動数帯域の成分が卓越しており、フローティングスラブ軌道とすることによりそれが良く低減されている。分岐部では10Hzから上の振動数帯域、特に10Hzおよび12.5Hz、100Hzおよび125Hzの帯域で一般部より5～10dB程度も大きくなっている。

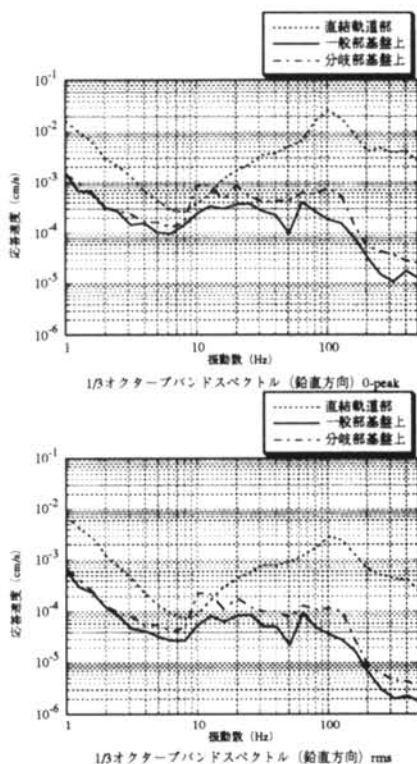


図-10 1/3オクターブバンドスペクトル

パワースペクトル密度関数で見られた60数Hzでの共振現象が63Hzの振動数帯域でのピークとなって確認できる。この共振現象についてはここでは詳しくは触れないが、GERB社の調査によればねユニット内の荷重支持部材の一部の共振現象が原因であったことが確認されており、部品交換等の対策が講じられている。この問題を解決することにより、20Hzから250Hzくらいまでのスペクトルが滑らかな右下がりの曲線になると予想される。

4.4 フローティングスラブ軌道の振動低減効果

図-11に鉛直方向の振動に対するコイルばねフローティングスラブ軌道の振動低減効果を表すものとして、(1)式より計算した振動低減効果値を示す。

$$\text{振動低減効果} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{一般部基盤上応答速度}}{\text{直結軌道部応答速度}} \right) \quad (1)$$

図-11の破線は固有振動数5Hz、減衰5%の1質点系のばね-マスモデルにおける質点から基礎への力の伝達率を示したもので、フローティングスラブ軌道の理想的な状態（スラブ；剛体、基礎；固定、荷重；一様）での振動低減効果を表すものである。

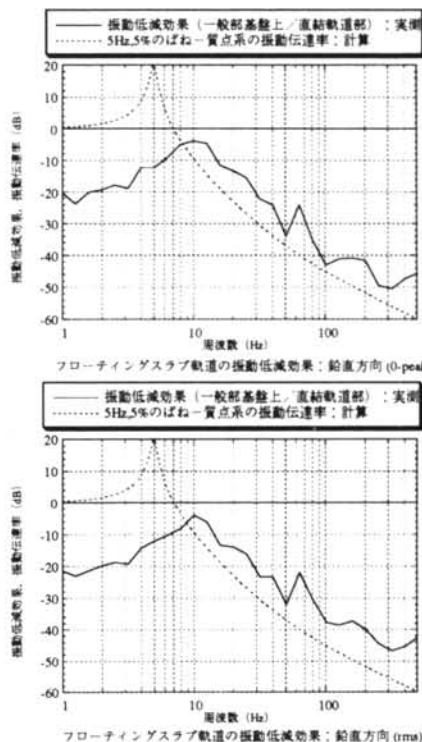


図-11 フローティングスラブ軌道の振動低減効果

質点の質量：m

ばね定数：k

減衰定数：h

$$\text{ばね-マス系の固有振動数：} \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\text{力の伝達率：} Z = \sqrt{\frac{1 + (2h\omega/\omega_n)^2}{\{1 - (\omega/\omega_n)^2\}^2 + (2h\omega/\omega_n)^2}} \quad (2)$$

図を見ると、5～10dBの差はあるものの、フローティングスラブ軌道の振動低減効果曲線は、10Hz以上の振動数領域については理論的なばね-マスモデルの力の伝達率曲線とほぼ同じ傾向を示している。5～10dBの差については、直結軌道部とフローティングスラブ軌道では地盤の影響が異なることや、防振軌道一般部での電車の速度が直結軌道部での電車の速度より速い（防振軌道一般部のほうが直結軌道部より加振力が大きい）ことなどが理由として考えられる。

63Hzの振動数帯域ではばねユニット内の荷重支持部材の共振現象により効果が下がっているものの、30Hz以上の振動数帯域では20dB以上、100Hz以上

の振動数帯域では40dB以上の振動低減効果が認められる。振動低減効果の曲線を見ると、63Hzの振動数帯域でも、ばね要素材の共振現象がなければ、30dB以上の振動低減効果が期待できるものと考えられる。

振動低減効果曲線を見ると、フローティングスラブ軌道一般部の基盤上での振動が直結軌道部での振動より大きくなっている帯域はなかった。スラブの固有振動数である5Hzの帯域では共振により振動が大きくなることも予想されたが、10Hz付近で直結軌道部とほとんど同じレベルとなるものの上回る傾向は見られない。この理由としては、フローティングスラブ軌道では剛体に近いスラブをばねで支持しており、基盤と軌道部とは縁が切れた状態で、低周波の振動にあたる静的な沈み込みが長さ30m、幅6mのスラブ全体の挙動となるのに対して、直結軌道部では土路盤の上にアスファルト舗装がされているだけなので電車の車輪が通過する際の局所的な挙動（沈み込み）が大きいためと考えられる。

4.5 水平方向振動

ここまで鉄道振動で特に問題とされる鉛直方向の

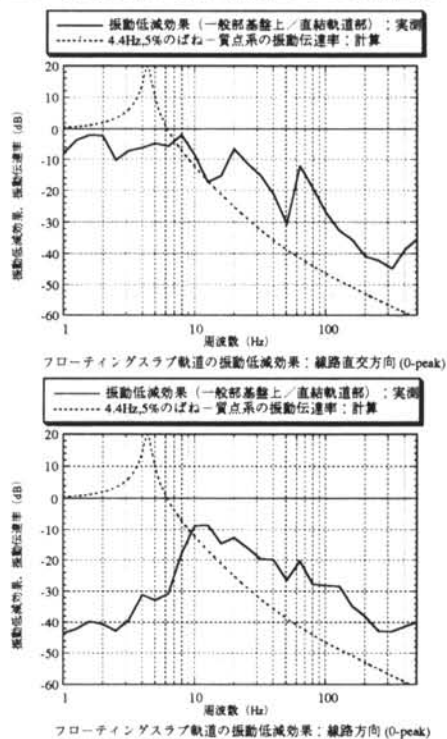


図-12 水平方向振動低減効果

振動に着目して検討結果を述べてきた。今回の測定では水平方向振動の計測も行っているので、フローティングスラブ軌道の水平方向の振動低減効果についても測定結果のみ示すことにする。

図-12に水平方向振動に対するコイルばねフローティングスラブ軌道の振動低減効果を示す。振動低減効果値算出には(1)式を用い、スラブの水平方向固有振動数は4.4Hz、減衰は鉛直と同じ5%と仮定して、1自由度ばね-マス系の力の伝達率と比較することとした。

線路直交方向の振動低減効果曲線を見ると、63Hzの振動数帯域でのばねユニット荷重支持部材の共振による低減効果の低下の他に、20Hzの振動数帯域でも低減効果の低下が見られる。

線路方向の振動低減効果曲線を見ると、30Hz以上の帯域で20dB以上の効果を発揮しているものの、ばね-マスモデルの理論値（力の伝達率）と比較すると、効果はかなり低い。

§5. まとめ

ドイツで実施された市電のコイルばねフローティングスラブ軌道における振動測定の結果より、以下のことがわかった。

- ドイツの市電においても、鉄道振動の固体音領域での卓越振動数は63~125Hzの帯域にある。
- レール継ぎ目部を含む軌道分岐部では、一般部に比べて振動数帯域によっては5~10dBも振動が大きくなることもある。
- コイルばねフローティングスラブ軌道は、1質点系のばね-マスモデルで表される防振支持システムをほぼ実現することができる。
- コイルばねフローティングスラブ軌道は、鉄道振動で問題となる30Hz以上の固体音領域で20dB以上、100Hz以上では40dB以上の高い振動低減効果を持つことが確認された。

今回の計測結果より、コイルばねフローティングスラブ軌道の良好な防振効果が確認され、1自由度系のばね-マスモデルで理論的に計算される振動伝達率で振動低減効果を予測できることがわかった。現在、国内での案件適用に向けてディテール等の詳細検討を進めているところである。

今回の測定結果で見られた水平方向の振動低減効果が低いことなどについては、今後さらに、計測デ

ータの分析やレール連続による拘束効果などを考慮した解析を進め、後日報告する予定である。

謝辞 今回の計測において、GERB社のThomas Jaquet氏ならびにBinod K. Bhartia博士、Günter K. Hüffmann博士に多大な協力を頂きま

したことに深く感謝いたします。また、欧州滞在の際には、Shimizu GmbHおよびShimizu France S.A.の皆様、ならびにGERB社関係者の方々にお力添えを頂きましたことに深く感謝致します。