

コイルばね防振軌道の実験および設計・施工

鈴木 健司 (技術研究所) 渡辺 弘之 (技術研究所) 塩川 英世 (技術研究所) 山本 与一 (土木東京支店) 吉田 成一郎 (土木東京支店) 峯垣 明 (土木本部) 時弘 みどり (土木本部)

Experiments, Design and Installation of the Floating Trackbed Using Coil Springs

by Kenji Suzuki, Hiroyuki Watanabe, Hideyo Shiokawa, Yoichi Yamamoto, Seiichiro Yoshida, Akira Minegaki and Midori Tokihiro

Abstract

A floating trackbed using coil springs is one of the railway systems which reduces railway vibration. There are some in use in Europe. GERB Vibration Control Systems and Shimizu Corporation have jointly carried out various experiments and analysis with the aim of applying this system in Japan. We measured the railway vibrations on the system that is being applied in Germany, vibrated a model slab on a shake table, constructed a 20m test slab and carried out motor trolley running test in Japan. The results of these experiments i.e., effects of reducing vibration, seismic response, train running safety are discussed in this paper.

概要

コイルばね防振軌道は鉄道振動を大幅に低減できる工法で、欧州等では既の実績がある。日本国内で適用できるようにドイツのGERB社との共同開発を進めてきた。欧州の実施案件での振動測定により防振効果を確認し、振動台での実大モデルによる地震波加振実験により地震時の安全性を確認し、建設中の営業線での試験施工ならびに軌道モータカー走行試験により施工性および走行安全性ならびに防振効果を確認した。

§1. はじめに

コイルばね防振軌道は、軌道スラブを弾性支承で支持して鉄道振動の伝搬を大幅に低減するフローティングスラブ軌道の一つで、図-1、図-2に概略図を示したようにコイルばね支承を軌道スラブ内に埋め込むことによって施工性を向上し、狭い設置空間にも適用可能にした工法である。欧州など海外においては既の実績があり、地下鉄や鉄道の防振工法として実施案件も増えている。しかしながら、日本は地震国であり、国内案件適用のためには地震時の安全性や国内設計基

準との整合性の確認が必要条件である。

以下に、コイルばね防振軌道を日本で適用するために行った一連の検討ならびに実験の実施状況とその結果について述べ、本工法の日本への適用性について総括する。

§2. 欧州の実軌道での振動測定

コイルばね防振軌道の振動低減効果を確認するために、1995年11月にドイツのビーレフェルト市の路面

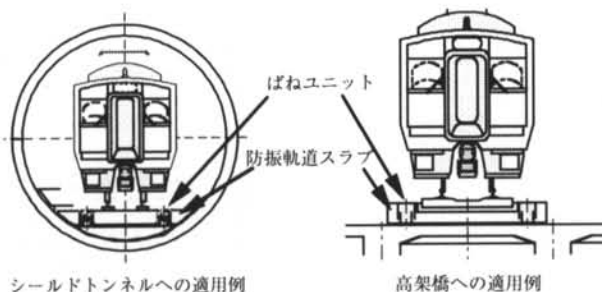


図-1 コイルばね防振軌道適用例

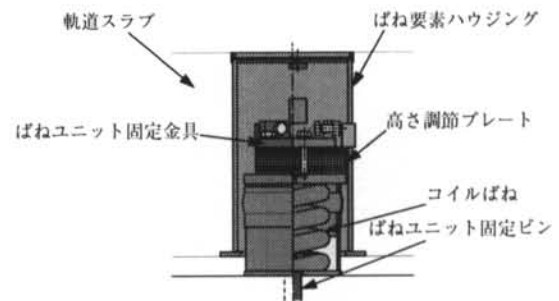


図-2 コイルばね支承

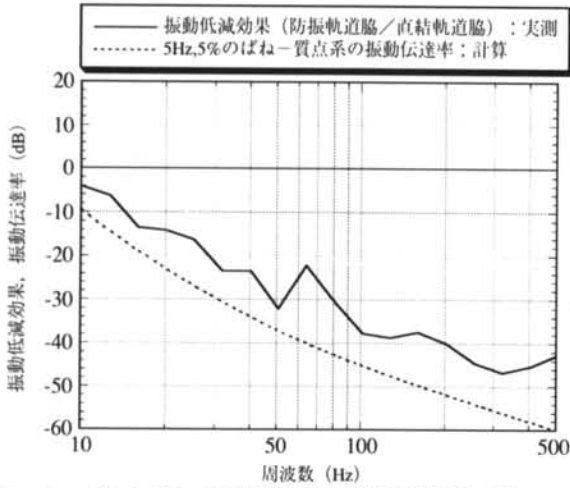


図-3 ドイツでの測定結果 (振動低減効果)

電車に適用した防振軌道において振動測定を実施した。

詳細については前報りで報告済みであるので、ここでは結果のみ示す。

図-3に防振軌道脇と防振軌道前後の直結軌道脇での測定結果から算出した振動低減効果を示す。鉄道からの固体音で問題となる63Hzから250Hzの帯域で、20dB以上の低減効果が確認できた。

§ 3. 振動台実験

コイルばね防振軌道の基本特性ならびに地震時の挙動を確認するために振動台実験を実施した。また、本防振軌道はスラブをばねユニットと油圧ジャッキでリフトアップする特殊な施工法を用いるので、その施工確認も同時に行った。

3.1 試験体

試験体は、単線のスラブ直結型のコイルばね防振軌道を想定し、振動台に積載可能な縮小モデルを考え、幅2,300mm×厚さ420mm×長さ3,720mmのコンクリートスラブを6台のコイルばね支承で支持する形状とした。試験体のスラブ重量は84.3kNで、設計鉛直固有振動数は8.0Hz、水平固有振動数は7.6Hzと実際の目標固有振動数に近い値とした。試験体を振動台上に設置した際には、周囲に6mmの隙間を空けてゴムマットを貼り付けた鋼製架台を配し、大きな水平変形が生じた際にはそこに衝突してそれ以上の変形を制限するストッパーとした。

コイルばね防振軌道のスラブは、現場打ちコンクリートではばねハウジングをスラブ内に一体に打ち込むことを基本としているが、試験体のスラブについては、ばねハウジングを埋め込む部分のみ箱抜きをした

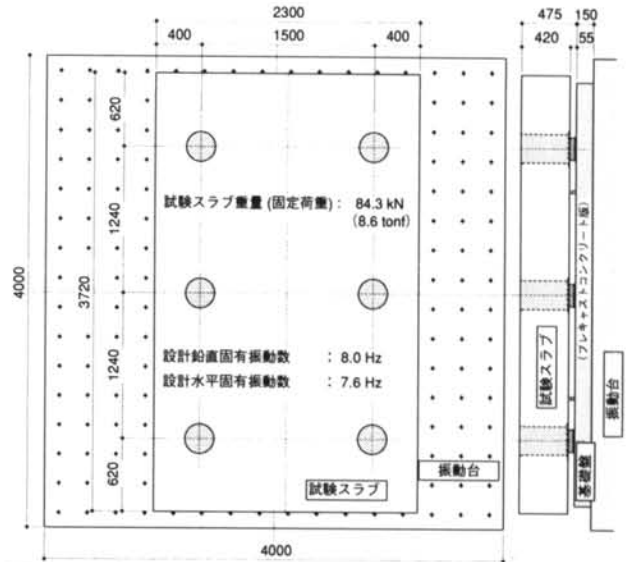


図-4 振動台および試験体

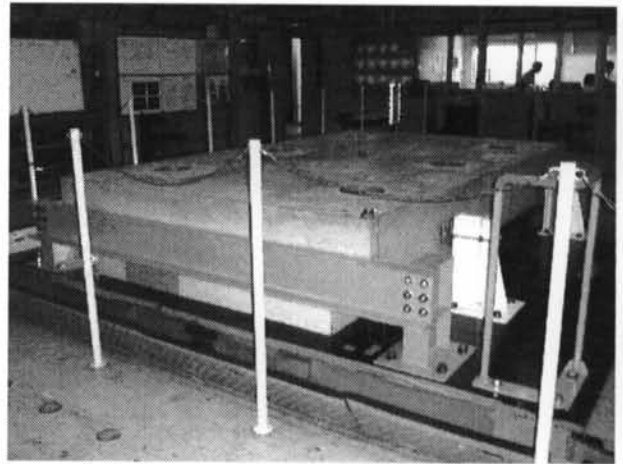


写真-1 試験体

プレキャストコンクリート版を持ち込み、あとからはばねハウジングを打ち込む形式をとった。

通常の軌道のコンクリート路盤の代わりとして振動台の上に厚さ150mmのプレキャストコンクリート版を固定し、その上にばねユニットを設置した。欧州ではばねユニットをコンクリート上に置くだけで特に固定していないので、いろいろな設置条件での地震時挙動を確認する目的で、ばねユニットを固定しない状況、および粘着パッドを敷き込んだ状況、ばねユニットがずれないように簡易に固定した状況について試験を行った。固定しないで置いただけの状況では加振時にばねユニットにわずかながたつきがあったので、薄いゴムマットを調整パッドとして敷き込んだ。粘着パッドはアスファルトを含浸させたジュート板で、欧州では建物や機械を防振する際に使用しており、ばねユニットと支持構造あるいは基礎との間に敷き込むと、荷重がかかった際にアスファルトが滲出してきて

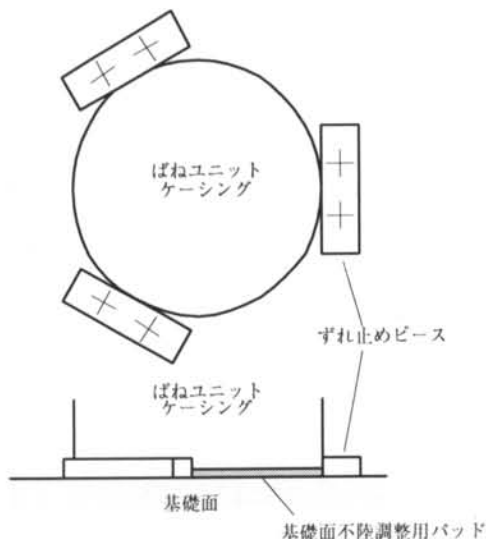


図-5 コイルばね支承簡易固定法

粘着力を発揮するというものである。簡易固定法はアンカーボルトを用いず任意にばね支承の取り出しが可能な固定法の模擬機構として、ばね支承底部を周りから3箇所で見込み込む形にアルミ板を設置した。

図-4に試験体の図を示し、写真-1に振動台の上の試験体の写真を示す。図-5に実験時の簡易固定法の模式図を示す。

3.2 実験項目

振動台での実験の前に、スラブをばねユニットと油圧ジャッキでリフトアップする施工法の確認実験を行った。

振動台では、スイープ加振と地震波加振の2種類の加振を行った。

スイープ加振は、防振スラブの固有振動数などの基本特性を確認するために、上下方向および水平長さ方向、水平直交方向の計3方向について、0.5～50Hzの範囲で行った。また、観測された固有振動数について正弦波加振を行い、加振停止後の減衰波形を観測した。

地震波加振は、地震時の挙動を確認するために、EL CENTRO波および十勝沖地震 HACHINOHE波の25kineおよび50kine規準化入力と、阪神淡路大震災の神戸海洋気象台での記録波ならびに財団法人鉄道総合技術研究所が出した「新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料」²⁾の設計用入力地震波の中で最もレベルの大きいG2地盤用適合波(G2A)を入力した。

3.3 実験結果

実験の結果は以下の通りである。

3.3.1 施工確認実験

PC工場で製作したハーフプレキャスト版を振動台



写真-2 油圧ジャッキを用いたリフトアップ作業

脇の反力床に持ち込み、箱抜き部分にばねハウジングを挿入し、隙間にコンクリートを流し込んだ。コンクリート硬化後、振動台の上に設置したプレキャストコンクリート版の上に移設し、コイルばね支承をスラブ上から装填し、油圧ジャッキでスラブをリフトアップさせた。本実験ではリフトアップ量を55mmとした。リフトアップ作業は簡単かつ確実に実施できた。

写真-2にスラブリフトアップ作業の様子を示す。

3.3.2 スイープ加振、正弦波加振実験

スイープ加振ならびに正弦波加振の結果より得られた試験スラブの固有振動数ならびに減衰比を表-1に示す。

基本固有振動数が鉛直方向設計値8.0Hzに対して実測値7.6Hzと低めであったが、これは下に置いたプレキャストコンクリート版表面の不陸調整用ゴムパッドの影響が少し出ているものと思われる。スラブの重量の実測値は設計値とほとんど変わらなかった。

水平方向は設計値7.6Hzに対して2割ほど低めになっているが、これはロッキングの影響が大きく出ているためである。スラブのロッキング動があるのに加えて、ばね支承自体も不陸調整パッドの上でロッキングするため、スラブ重量と水平ばねとから算出した設計固有振動数に比べて特に短辺方向が低い値になっている。

減衰定数は3～5%とほぼ目標の値が得られている。

	スラブ重量	固有振動数			減衰	
		鉛直(Z)	水平(X)	水平(Y)	鉛直(Z)	水平(X)
設計値	84.3 kN (8.6 tonf)	8.0 Hz	7.6 Hz		5 %	
実測値	84.3 kN (8.6 tonf)	7.6 Hz	6.1 Hz	6.5 Hz	3 % 以上	5 % 以上

表-1 固有振動数の設計値と実測値

3.3.3 地震波加振実験

各入力波に対して求めた応答スペクトルから設計固有振動数および実測固有振動数で読みとった水平変形量と実際の加振時変形量とを比較して表-2に示す。25kine入力に対しては、実測固有振動数から算定される変形量と実際の応答変形量はほぼ等しくなっているが、50kine入力に対しては、水平変形量が大きくなるに従ってスラブのロッキング動も加わり、単純に水平変形するとして求めた計算値より大きな変形量となる。

スラブとの隙間6mmでゴムを貼り付けたストッパーを設置してあるので、衝突後のゴムの変形を含めても約9mmで変形が制限される。スラブがストッパーに衝突したのはEL CENTROおよびHACHINOHEの50kine入力、神戸海洋気象台観測波入力、G2地盤用適合波入力の際であるが、激しく衝突してもスラブに損傷を生じることなく変形を抑えられることが確認できた。

ばね支承の設置方法に関しては、不陸調整パッドの上に置いただけでは地震波入力時にばねユニットがずれて、加振後スラブ位置が移動していた。粘着パッド敷きにしても荷重がそれほど大きくはないため十分な粘着力が得られず、地震波入力ではスラブ位置が移動してしまった。簡易固定法では、最も入力の大きなG2地盤用適合波入力時にもばね支承がずれることなく保

入力波		f0=7.6Hz, h=5%で評価	f0=6.1Hz, h=5%で評価	実験結果
EL CENTRO N-S	25 cm/s	2.5 mm	3.6 mm	3.6 mm
	50 cm/s	5.0 mm	7.1 mm	(ストッパーに衝突)
HACHINOHE N-S	25 cm/s	1.0 mm	2.0 mm	2.1 mm
	50 cm/s	1.9 mm	4.0 mm	(ストッパーに衝突)

表-2 地震応答変形量の計算値と実測値

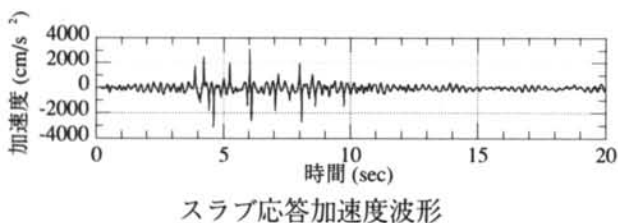
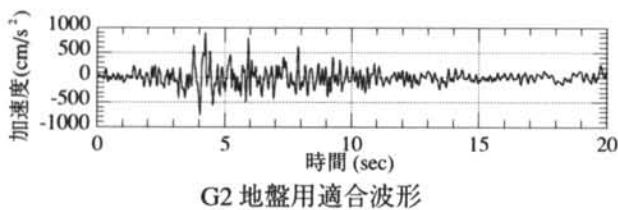


図-6 G2地盤用適合波形とスラブ応答加速度波形

持できた。どの入力時にもばね支承が飛び跳ねるような挙動はなかったので、高さの低い簡易なずれ止めでもそれを乗り越えて位置がずれてしまうようなことはなかった。この結果から、基盤面から突出させた突起物をばね支承に接して配置するだけで、地震時にもばね支承の位置がずれないように固定できることがわかったので、実施時のずれ止めとしては施工性も考慮して、図-2に示したような基盤面から突出させたピンにばね支承ベースプレートに空けた穴を被せる方式を採用することとした。

図-6にG2地盤用適合波の入力波形とスラブの応答波形を示す。応答波形にいくつかの尖った大きな加速度応答が見られるが、これはスラブがストッパーに衝突した際の衝撃である。

§4. 営業線工事区間での試験軌道敷設

コイルばね防振軌道は日本国内での実績がなかったため、実案件適用の準備段階において試験軌道の設計、施工と走行安全性確認を目的とした試験を実施した。

試験軌道は、2000年5月に東京臨海高速鉄道りんかい線第二期工事区間(東京テレポート~天王洲アイル間)に敷設した。単線シールド区間で長さ20m、曲線半径800m、カント70mm、設計列車速度100km/hである。

試験は、軌道モーターカー走行試験と水平載荷試験を計画した。試験軌道は試験後も営業線の一部として使用する。

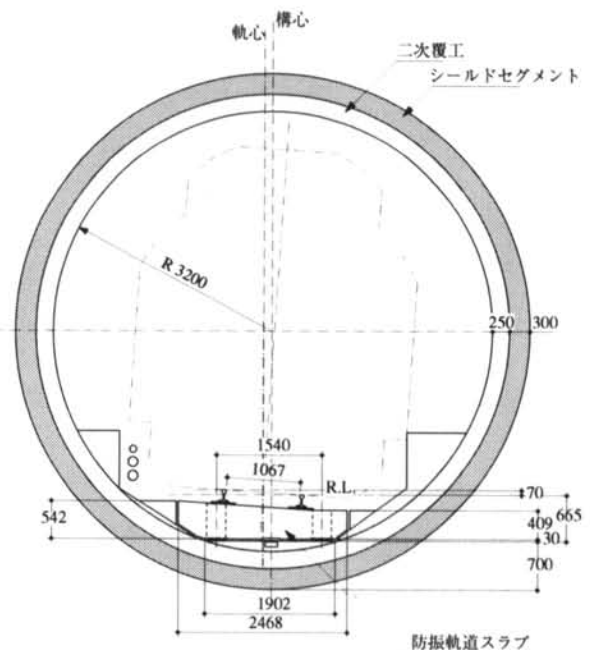


図-7 試験軌道断面

軌道スラブの断面は既存のシールドトンネル内に既に敷設中だったバラストマット軌道(バラストマット敷きの有道床軌道に防振まくら木を併用)のレールレベルに合わせて、幅約2,470mm、内軌側厚さ約410mm、外軌側厚さ約540mmとした。コイルばね支承の標準間隔は線路方向1,250mm(レール締結間隔の2倍)としたが、営業時通過列車の荷重に対する耐久性と走行安全性を考慮して、端部から約5mの範囲のばね間隔を半分にして、前後のバラストマット軌道との軌道ばね係数比を小さくした。ただし、軌道モーター走行試験時には標準の防振軌道の挙動に近づけるために、試験に使用する軌道モーターの安全走行に必要な最小限の範囲(約2m)のみばね間隔を半分にした。試験時のばね配置での鉛直固有振動数は約10Hzとなる。

図-7に試験軌道の断面を、図-8に試験時と営業時のばね支承配置平面図を示す。

4.1 試験軌道の設計

コイルばね防振軌道のコンクリートスラブは「鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造」³⁾に準拠して、コンクリート桁として設計した。設計は試験時のばね配置での軌道モーター荷重に対してと、営業時のばね配置での設計列車荷重に対しての2通りで計算した。通過列車に対する走行安全性については別途、軌道モーター走行試験の結果も参照して解析・検討した。

4.1.1 試験軌道設計諸元

スラブ長さ	: 20m
設計荷重(試験時)	: モーター軸重(137kN)
設計荷重(営業時)	: K-12、S-16、M-10
列車速度(試験時)	: 50km/h
列車速度(営業時)	: 100km/h
曲線半径	: 800m
カント	: 70mm
コンクリート設計基準強度	: 24N/mm ²
鉄筋	: SD295A(D10)
	: SD345(D10以外)

4.1.2 設計計算結果

図-9に配筋図を示す。下筋の主筋はD25で、鉄筋量は約2.5kN/m³となった。

10m毎にスラブ側面に直径240mmのゴム板を3基埋め込み、その対面に6mmの隙間を設けて鉄筋コンクリートの突起物を構築し、大地震時のスラブの大変形を抑える耐震ストッパーとした。ストッパーとスラブは常時は接触しない。

コイルばね支承は、3.3.3で述べたように基盤面からステンレス鋼棒のずれ止め用ピンを15mm突出させ、ばね支承ベースプレートに空けた穴を被せる方

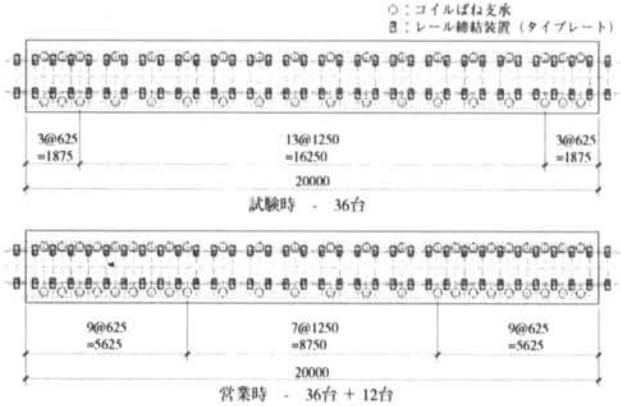


図-8 試験軌道のコイルばね支承配置図

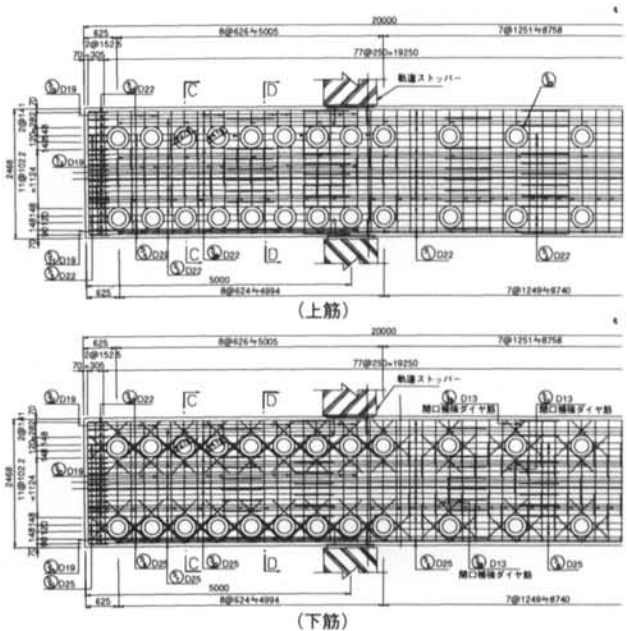


図-9 試験軌道配筋図

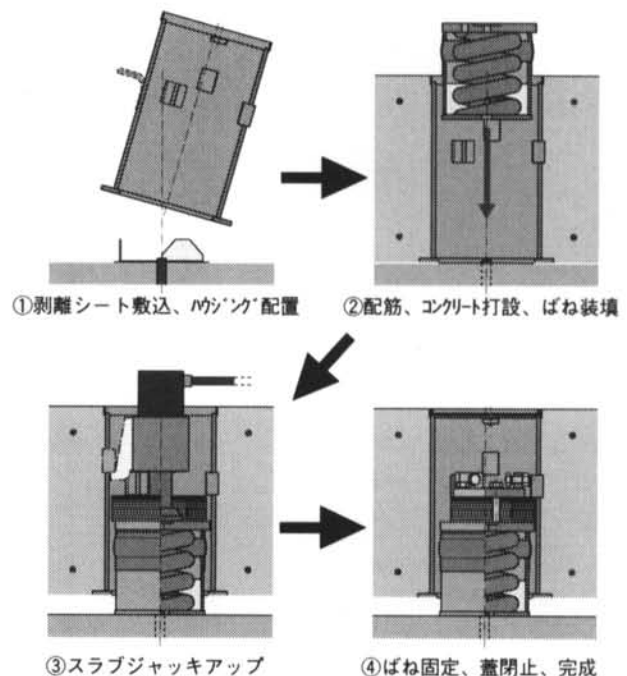


図-10 施工手順図

式とした。この方式により、スラブ上からばね支承を落とし込むだけで大地震時にも支承がずれないように保持することができ、また、簡単に取り出すこともできる。

4.2 試験軌道の敷設工事

試験軌道のスラブは基盤面（インバート）上にポリエチレンシートを敷き込んで下型枠代わりとし、その上にはばねハウジングを配置し、スラブ配筋をして側型枠を建て込み、ホッパー車を使ってコンクリートを場所打ちで打設した。コンクリート硬化後にスラブ上からコイルばね支承を装填し、油圧ジャッキでコイルばね支承に順番に荷重を加えながらスラブを少しずつ最

終的には30mmリフトアップさせた。スラブリフトアップ作業の前後にスラブ天端高さを測定してリフトアップ量を管理したが、最終的なリフトアップ高さは±2mm未満の誤差範囲に収まった。

レールはスラブ直結とし、スラブコンクリート打設時にタイプレート埋込部分を箱抜きしておき、スラブリフトアップ後にレールとタイプレートを所定位置に配置した後、無収縮モルタルを流し込んでタイプレートを固定した。

本試験軌道を構築するのに要した工期は約30日であった。

図-10に施工手順図を示し、写真-3から写真-8に施工時の写真を示す。



写真-3 試験軌道 施工開始時

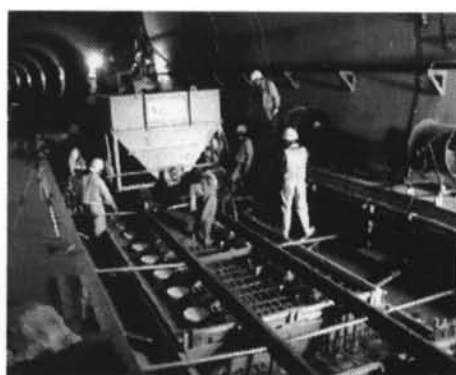


写真-6 試験軌道 コンクリート打設



写真-4 試験軌道 ばねハウジング配置



写真-7 試験軌道 ジャッキアップ



写真-5 試験軌道 配筋・型枠

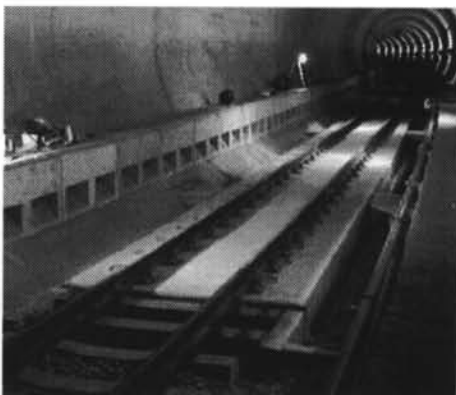


写真-8 試験軌道 完成写真



写真-9 軌道モーターカー

§ 5. 軌道モーターカー走行試験

前章で述べた試験軌道において、振動低減効果と列車走行安全性の確認を目的として、軌道モーターカー走行試験を行った。試験は、2000年5月に車重274kN（2軸、軸間3,700mm）の軌道モーターカーを走行させて、試験軌道およびその周辺で各種測定を実施した。写真-9に軌道モーターカーの写真を示す。

5.1 試験概要

軌道モーターカー走行試験は、軌道モーターカーを十分な助走距離を取って、試験軌道手前33mから試験軌道の奥22mまで計75mの区間を一定速度で走行させて、実施した。軌道モーターカーの走行速度は30km/h、40km/hおよび50km/hの3段階で、各速度段につき5本の測定を行った。振動低減効果に関する測定項目は、軌道脇のトンネル壁面での振動加速度で、走行安全性に関する測定項目は、軌道スラブおよびレールの輪重、横圧、鉛直変形、水平変形、レール応力である。

5.2 振動低減効果確認試験

振動低減効果確認のための振動測定は、鉛直方向の振動成分について、試験軌道中心とその前後3mの位置および前後のバラストマット軌道の位置の軌道脇トンネル壁面に振動加速度ピックアップを取り付けて行った。防振軌道脇の測定点での測定結果と前後のバラストマット軌道脇の測定点での測定結果との比較により振動低減効果を評価した。

図-11に振動測定点の配置図を示す。試験軌道前後にレール継ぎ目が存在したため、バラストマット軌道脇の測定点はレール継ぎ目から10m外側の位置とした。

5.2.1 振動測定結果

図-12に測定波形例を示す。同図の最上段はスラブ中央位置での輪重測定波形である。輪重測定波形により軌道モーターカーの前後輪がスラブ中央を通過した

時刻がわかるので、図中には前輪が各測点やレール継ぎ目位置を通過した時刻を▽で表示した。いずれの波形もレール継ぎ目部を車輪が通過する際に大きな衝撃的な振動加速度を記録している。試験軌道前後のバラストマット軌道脇（#1、#5）での波形を見ると、軌道モーターカーが近づいてくると振動加速度が大きく

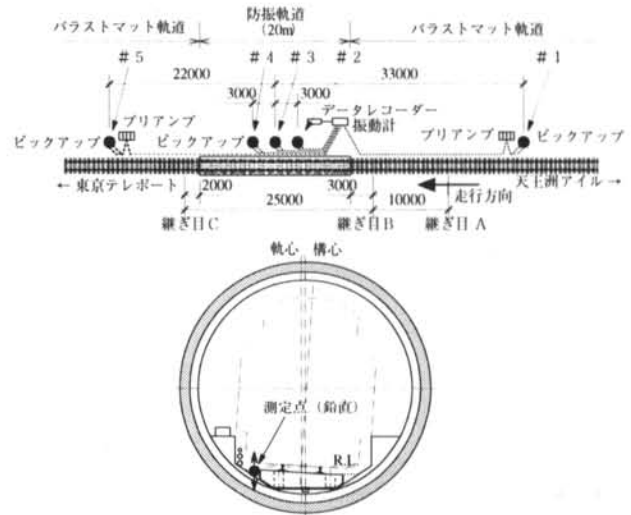


図-11 試験軌道振動測定配置図

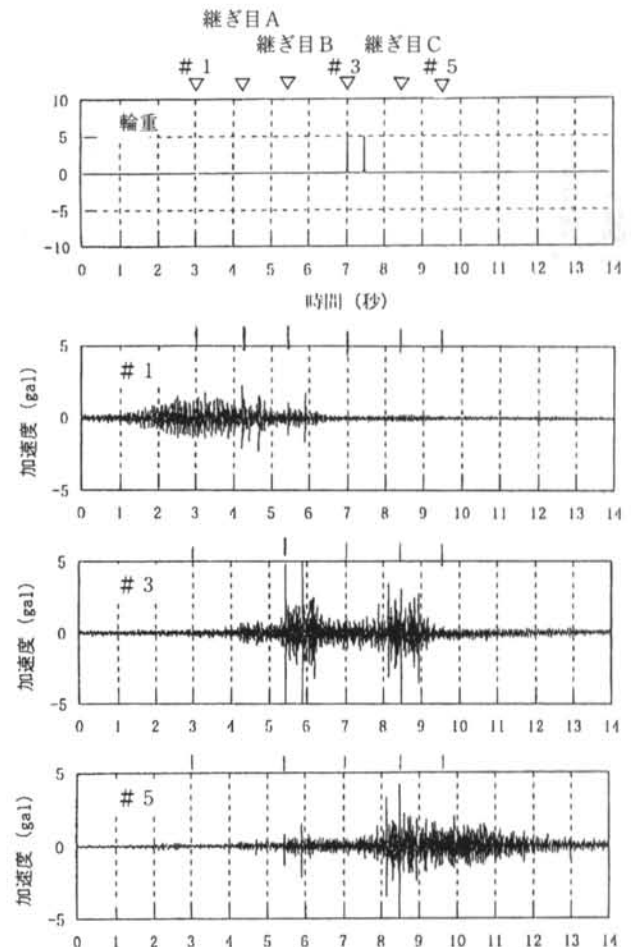


図-12 振動測定波形例

なり、通過後、遠ざかっていくと小さくなっていく様子がよく分かる。防振軌道脇（#3）での波形を見ると、前後のバラストマット軌道を軌道モーターカーが近づいてくると振動が大きくなり、試験軌道に載ったところで一旦振動が小さくなり、試験軌道から出ていったところでまた振動が大きくなるのが良くわかる。この波形からでも試験軌道が前後のバラストマット軌道より高い防振性能を持っていることが分かる。

5.2.2 データ分析

振動低減効果の算定は、各測定波形を1/3オクターブ分析してバンド毎の振動加速度レベルを算出し、防振軌道脇とバラストマット軌道脇で比較した。軸間3.7mの軌道モーターカーが長さ20mの試験軌道上に完全に載っている時間は走行速度50km/hのときで約1.2秒間である。そこで、各測定データから当該測定点の前を軌道モーターカーが通過する前後1秒間のデータを切り出して比較評価した。各データは振動波形を1/3オクターブ分析し、バンド毎のパワー平均レベル（振動加速度波形の自乗積分値をデータ長さで除したものを）を求めて評価した。固体音に対する評価を主眼におき、地下鉄等の鉄道から発生する固体音が63Hz帯域を中心としていることを考慮して、評価対象振動数は16～250Hzとした。

測定点は防振軌道脇3ヶ所、バラストマット軌道脇2ヶ所に設けたが、各速度とも、軌道種別が同じ測定点については測定位置の違いによる測定値のバラツキは比較的小さかったので、以下、軌道種別毎に各測定位置の平均レベルを求めて比較している。例として図-13に走行速度30km/hの際の各測定点での測定結果を示す。この図からも防振軌道脇（#2、#3、#4）の方がバラストマット軌道脇（#1、#5）より振動が小さくなっていることが分かる。

5.2.3 振動低減効果

図-14に、速度毎にバラストマット軌道脇と防振軌道脇との振動加速度レベル差を求めたものを示す。レベル差が大きいほど防振軌道脇の振動がバラストマット軌道脇より小さいことを示している。また、表-3に速度毎に求めたオールパスレベル値（振動数範囲16～250Hz）を防振軌道脇とバラストマット軌道脇で比較して示す。

図-14を見ると、20Hzおよび40～63Hzの帯域では速度によりバラツキが見られるが、その他の振動数帯域ではバラツキは小さい。各速度の算術平均値を見ると、16～20Hzでは約9dB、31.5～40Hzで約14dB、50～80Hzで約7dB、100Hz以上では4～6dBのレベル差になっている。また、表-3を見ると、オールパス値でも約7dBのレベル差となっている。

以上の結果より、地下鉄などから発生する固体音で

問題となる63Hz帯域の振動に着目すると、試験軌道はバラストマット軌道に比べて約7dBの振動低減効果があることがわかった。この値はオールパス値で見ても同じである。

財団法人鉄道総合技術研究所などの過去の測定事例によると、バラストマット軌道は通常のバラスト軌道に比べて約5dBの振動低減効果があることが確認されており、このことから試験軌道は通常のバラスト軌道に比べて約12dBの振動低減効果があると推定できる。また、バラストマット軌道は直結軌道に比べて50Hz以上で約11dBの振動低減効果があるとの調査結果⁴⁾から、試験軌道は直結軌道に比べて少なくとも18dBの振動低減効果があると推定できる。

試験軌道は試験後も営業線の一部として使用するこ

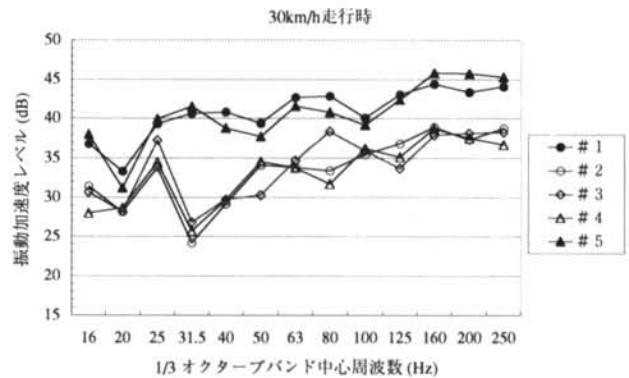


図-13 試験軌道測定結果の測定位置による違い

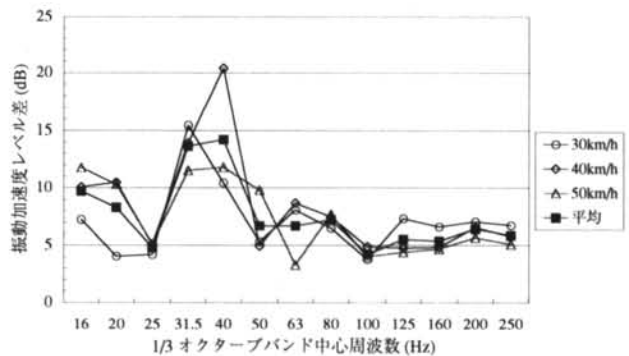


図-14 防振軌道脇とバラストマット軌道脇の振動加速度レベル差

	軌道モーターカー速度 (km/h)		
	30	40	50
バラストマット軌道 : A	53.0	55.2	55.4
防振軌道 : B	46.2	47.4	48.9
差 : (A-B)	6.8	7.8	6.5
差の平均	7.0		

表-3 防振軌道脇とバラストマット軌道脇での振動加速度レベル比較

とから、営業時に通過が予定される貨物列車の機関車荷重に対しても耐久性が確保できるよう設計しており、結果として防振軌道としては少し硬めのばね設定になっている。従って、試験軌道の振動低減効果も小さめになっていると考えられるが、それでも従来のゴム支承を用いたフローティングスラブ軌道と同程度(約20dB)の効果があることが確認できた。

5.3 列車走行安全性確認試験

列車走行安全性の検討は、軌道モーターカー走行試験の結果に加えて、水平載荷試験、静的FEM解析および動的輪重変動解析の結果を用いて検討した。

営業時の列車走行安全性を評価するためには、営業時の列車走行時の軌道の挙動(変形、応力等)が必要であるが、これらは静的FEM解析により求めた。試験軌道は試験時と営業時とではばね支承の数が変わるが、静的FEM解析は試験時のばね配置のモデルに軌道モーターカー荷重をかけたときの解析と、営業時のばね配置のモデルに設計列車荷重をかけたときの解析を行った。試験時解析の結果と軌道モーターカー走行試験の結果を比較して、モデル化の妥当性を確認した上で、営業時解析の結果を走行安全性評価の判断材料とした。解析時の荷重は衝撃を考慮した。水平方向についてはスラブをジャッキで水平に押し変形を測る水平載荷試験を行い、同様にFEM解析の結果と比較してモデルの妥当性を確認した。

5.3.1 列車走行安全性の評価指標

列車走行安全性に関する評価項目はスラブたわみ量、軌道面の角折れ、レール曲げ応力、負のレール圧力、および輪重変動率とし、その評価基準値は以下の値を用いた。

- 1) スラブたわみ量⁵⁾ 25mm
- 2) 軌道面の角折れ⁵⁾ 鉛直：目違い 2mm
角折れ 7.5/1000
水平：目違い 2mm
角折れ 4/1000
- 3) レール曲げ応力 128MPa⁶⁾
- 4) 負のレール圧力 締結装置の締結力の70%⁷⁾
= 4.3kN
- 5) 輪重変動率 電車については0.13(乗り心地も考慮)
機関車については0.20

軌道モーターカー走行試験における測定項目および測点数、測点配置を図-15に示す。

5.3.2 軌道モーターカー走行試験結果

1) 輪重

スラブ中央で測定された平均輪重からスラブ端部の輪重変動率を算出すると最大で0.15となり、機関車

の輪重変動許容値0.20よりも小さい値であった。

2) 横圧

全般に、横圧は内軌側前輪が最も大きく、最大で26kN程度であった。また、後軸外軌側の横圧が最も小さく、1~2kN程度であった。

なお、横圧の速度による差は小さかった。

3) 鉛直変位

走行試験によるスラブの鉛直変位量は最大で3mm程度であり、たわみ量の制限値25mmに対して十分小さい値であった。

4) 角折れ

各速度におけるレールの変位から鉛直角折れを求めると最大値は1.36/1000であり、基準値の7.5/1000と比較して十分小さい値であった。

一方、水平角折れについても最大値は0.95/1000であり、基準値の4/1000と比較して十分小さい値であった。

5) レール曲げ応力

測定におけるレール曲げ応力の最大値は約30MPaであり、レールの許容応力128MPaを十分下回っている。

5.3.3 静的FEM解析結果

鉛直方向の解析は、レールとスラブを梁要素で、軌道パッド、コイルばね、道床バラストをばね要素でモデル化した2次元FEMモデルで行った。水平方向の解析は、試験軌道のスラブのみをシェル要素で、コイルばねをばね要素でモデル化した2次元FEMモデルで行った。解析モデル図を図-16に示し、解析結果を軌道モーターカー走行試験結果、水平載荷試験結果と合わせて図-17にまとめて示す。

1) レール鉛直変位

軌道モーターカー荷重に対するレール鉛直変位は実測値の方が解析値よりもやや小さいが、これは実測の平均輪重が解析時に想定した値よりも小さかったため

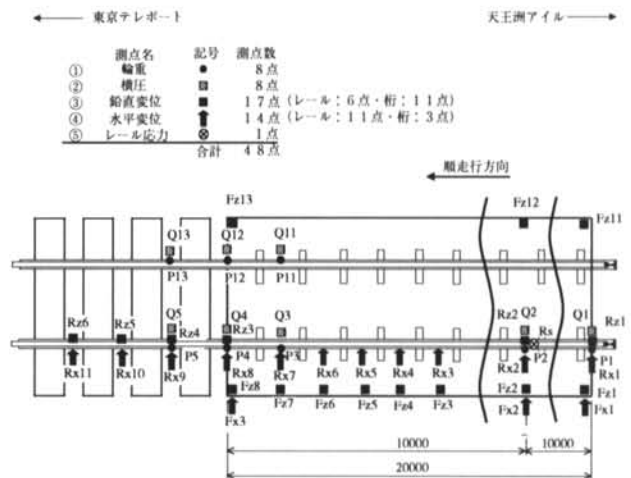


図-15 走行安全性評価用測点配置図

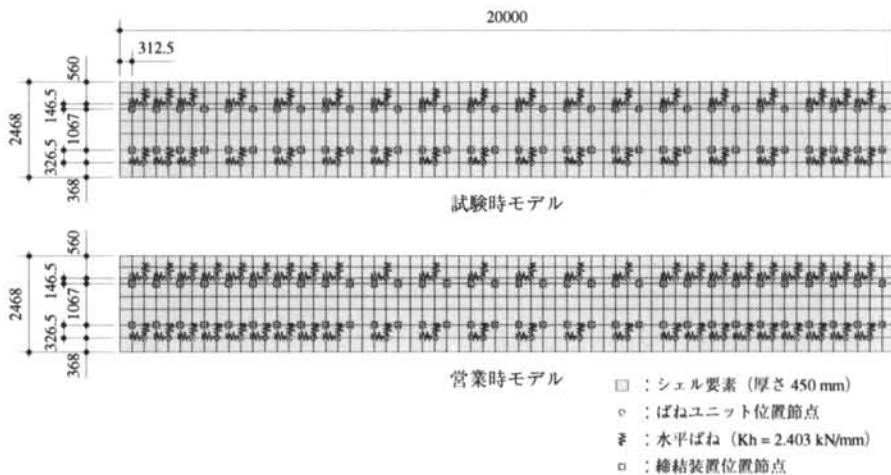
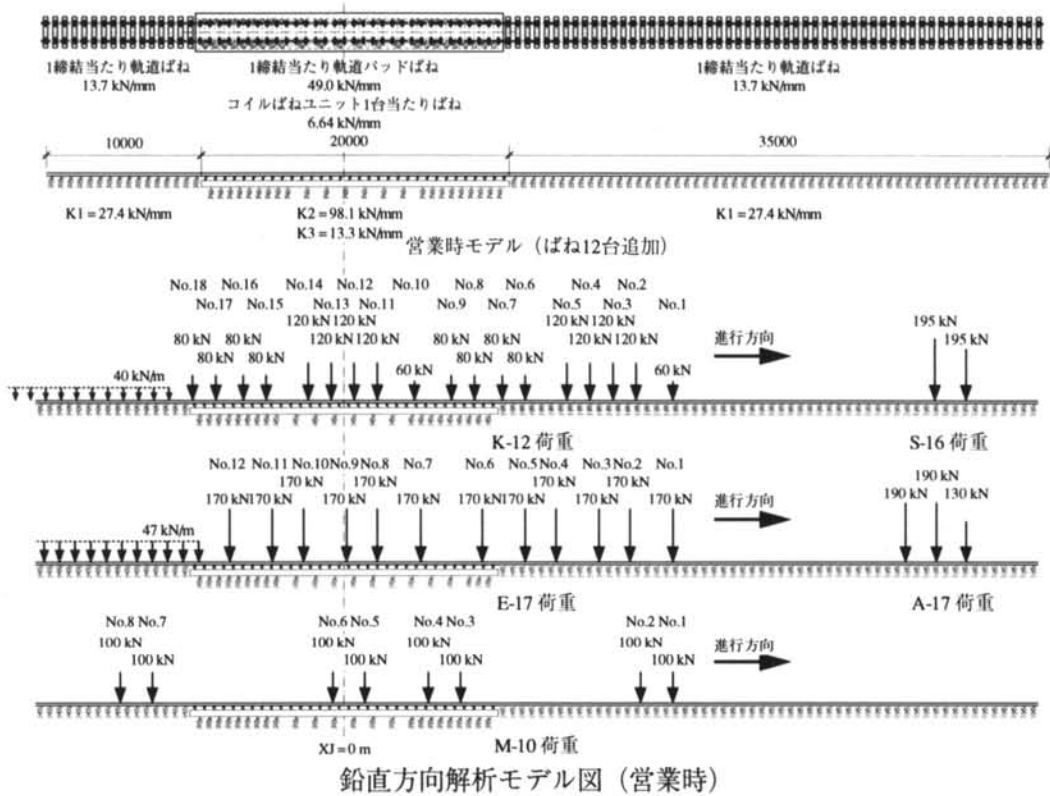
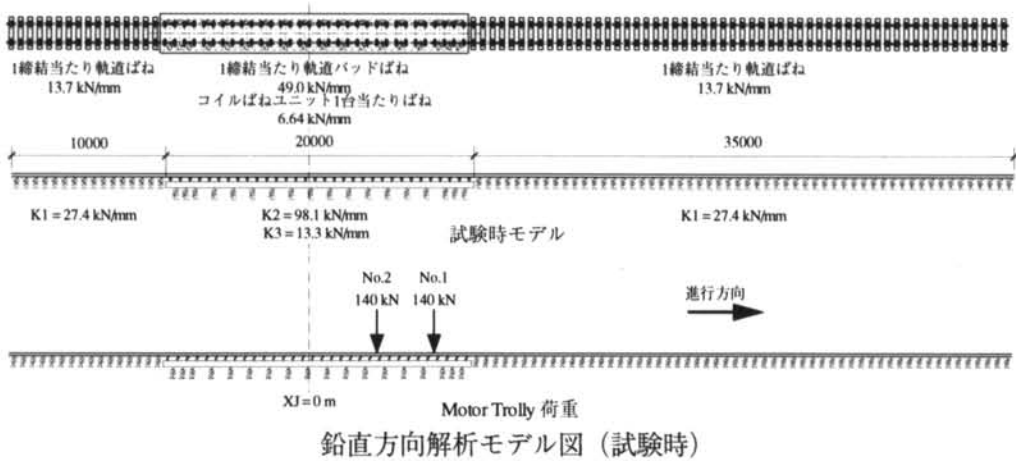


図-16 静的FEM解析モデル図

で、輪重/スラブ変位の値で比較すると、実測、解析とも 25kN/mm 程度となり、良い一致を示した。この結果、解析モデルはほぼ妥当なモデルであると判断された。

各設計荷重における計算結果からレール角折れの最大値を求めると 2.0/1000 であり、基準値の 7.5/1000 と比較して十分小さい値であった。

2) スラブ鉛直変位

解析によるスラブ鉛直変位量はすべての列車荷重において、スラブたわみの制限値である 25mm 以内となった。

3) レール曲げ応力

レール曲げ応力の最大値は S-16 荷重の場合の 101.7MPa であり、レールの許容応力 128MPa より小さい値であった。

4) 負のレール圧力

境界部の支持ばね係数が均一でないところでは載荷時の変形差からレール締結装置に負圧が発生する可能性があり、この負圧がレール締結装置の締結力を超えると軌道パッドがずれ出すおそれがある。

解析結果における負のレール圧力の最大値は 28.4kN であり、許容値の 4.3kN を大きく上回った。これは解析上、軌道パッドのばねが圧縮と引張りでのばね定数を用いていることが原因となっており、見かけ上大きな引張り力が作用してしまうためである。負のレール圧力が最大の時のレールの上向きの変形量としては 0.6mm 程度であることと、タイプレートおよび軌道パッドの形状がずれ出しを防止する構造となっていることから、事実上問題はないと考えられる。

5) 水平変位

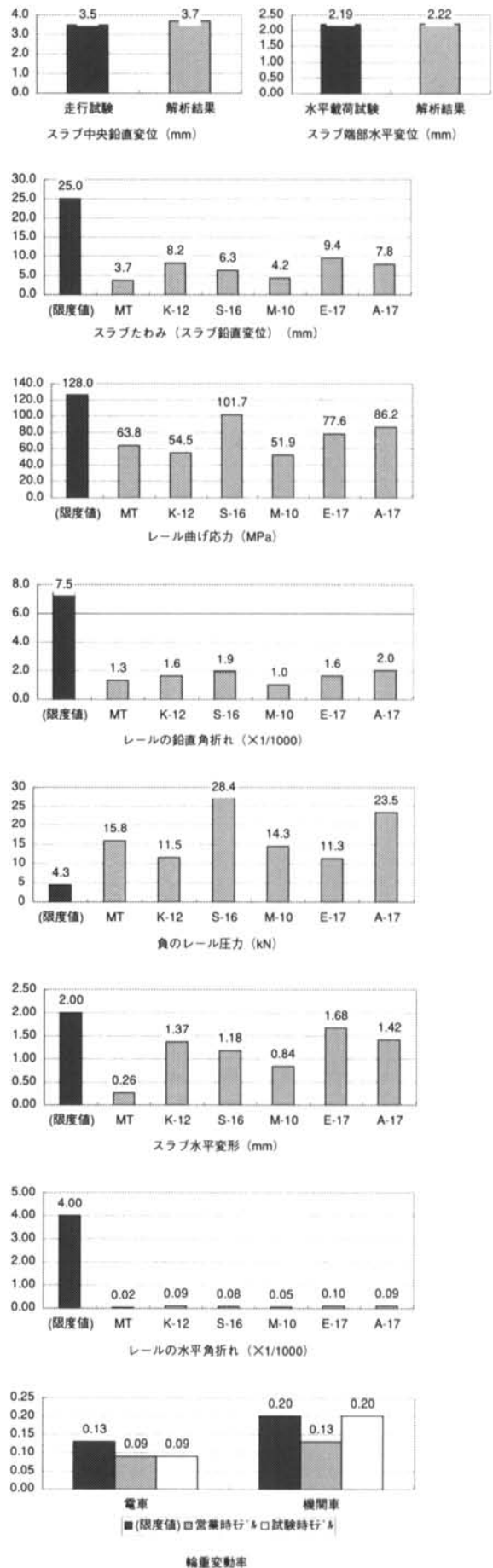
水平載荷試験結果と FEM 解析結果は良く一致しており、解析モデルは妥当なモデルであると判断された。

水平荷重は曲線部の遠心荷重を考慮して定義した。解析の結果、各設計荷重による角折れの最大値は E-17 荷重の時の 0.096/1000 であり、限度値の 4/1000 より十分小さい値であった。

5.3.4 動的輪重変動解析結果

試験軌道とその前後のバラストマット軌道の境界部において、軌道ばね係数が変化するが、これにより生じる輪重変動を推定するため、実際に走行する予定の電車および電気機関車をモデル化し、財団法人鉄道総合技術研究所のプログラムにより動的輪重変動解析を行った。列車速度は 100km/h とした。

軌道ばね係数については静的 FEM 解析結果をもとに近似した。解析では営業時のモデルとコイルばねの少ない試験時のモデルについて検討した。



図一 17 試験結果および解析結果

一般に車両が軌道ばね係数の小さい方から大きい方へ走行する場合の方が、その逆の場合よりも輪重変動が大きくなることが知られているため、解析における走行方向は試験軌道→バラストマット軌道とした。

営業時のモデルに対する電気機関車での解析結果では、輪重変動率の最大値は0.13となり、機関車の評価基準値0.20を満足した。一方、電車での解析結果では、輪重変動率の最大値は0.09であり、評価基準値の0.13を満足した。

コイルばねの少ない試験時のモデルの方がバラストマット軌道との軌道ばね係数比が大きいが、試験時のモデルについても同様に輪重変動解析を行った結果では、電車に対する輪重変動率の最大値が0.09、機関車で0.20となり、それぞれの評価基準値以内の値となった。

§ 6. まとめ

鉄道振動防振工法であるコイルばね防振軌道について、各種実験および検討を実施した。

3次元振動台での地震波加振実験により、適切なコイルばね固定機構や耐震ストッパーを設置することに

より、阪神淡路大震災クラスの地震に対しても軌道スラブやコイルばね支承が破損することなく、その機能を維持できることが確認できた。

営業線の工事区間での試験軌道敷設工事により、日本の基準、規格に基づいた設計手法が確認でき、施工手順も確認できた。

試験軌道での軌道モーター試験および各種解析により、コイルばね防振軌道の走行安全性と振動低減効果が確認できた。また、その検討手法も確認できた。

以上の一連の実験・検討により、コイルばね防振軌道の性能が確認できたとともに、設計・施工法が確立できたことになり、日本での実案件適用のための条件が整ったと言える。

謝辞

全ての実験の実施について GERB Vibration Control Systems社殿ならびに株式会社エーエス殿にご協力いただきました。試験軌道の敷設および軌道モーター走行試験実施には東京臨海高速鉄道株式会社殿ならびに日本鉄道建設公団殿にご協力いただきました。試験軌道の設計および各種検討・評価には財団法人鉄道総合技術研究所殿にご指導ご協力いただきました。末筆ながら感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 鈴木, 渡辺: “コイルばね防振軌道の電車走行時振動に関する検討”, 清水建設研究報告, No.64, pp.49 ~ 56, 1996.
- 2) “新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料”, 財団法人鉄道総合技術研究所, 1996.
- 3) “鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造”, 財団法人鉄道総合技術研究所, 1992.
- 4) 安藤: “鉄道から発生する振動とその対策”, 日本音響学会講演論文集, 1996.
- 5) 須田, 長門, 徳岡, 三浦: “新しい線路”, 日本鉄道施設協会, 1997.
- 6) 佐藤, 三浦: “走行安全ならびに乗り心地を考慮した線路構造物の折れ角限度”, 鉄道技術研究報告, No.820, 1972.
- 7) 名村, 松尾, 三浦: “支持弾性遷移区間の軌道の挙動解析”, 鉄道総研報告, Vol.11, No.2, 1997.
- 8) 渡辺, 鈴木: “防振軌道の地震時応答に関する振動実験”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 環境工学 I, pp.279 ~ 280, 1999.
- 9) 木村, 中島, 峯垣, 山本, 塩川, 鈴木: “コイルばね防振軌道の設計と施工”, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.47 ~ 50, 2000.
- 10) 鈴木, 藤井, 芦谷, 渡辺, 木村, 中島: “コイルばね防振軌道の振動低減効果に関する検討”, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.51 ~ 54, 2000.
- 11) 桃谷, 鈴木, 木村, 中島, 名村, 安藤, 堀池: “コイルばね防振軌道の走行安全性に関する検討”, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.59 ~ 62, 2000.