

高減衰スラブ軌道による高速走行時の地盤振動の低減効果

瀧上 翔太* 渡辺 勉** 横山 秀史***
 高橋 貴蔵* 桃谷 尚嗣*

Reduction Effect of Ground Vibration by Floating Slab Track in High-Speed Rail

Shota FUCHIGAMI Tsutomu WATANABE Hidefumi YOKOYAMA
 Takatada TAKAHASHI Yoshitsugu MOMOYA

If the running speed of vehicles further increases in the near future, the ground vibration propagating to the surroundings may increase. In this study, we focus on a floating slab track as a countermeasure against ground vibration and evaluate the dynamic response at 400 km/h by numerical analysis. Moreover, we carry out the vibration test for full-scale track model and confirm that a floating slab track shows high reduction effect of ground vibration.

キーワード：高速走行，地盤振動，高減衰スラブ軌道，高架橋，起振機

1. はじめに

現在の新幹線の営業最高速度は320km/hであるが、将来的には新幹線の走行速度はさらに高速化すると考えられる。一方、鉄道車両の高速化に伴い、周辺へ伝播する騒音や振動が増加する可能性があり、高速化にあたってはこれらの沿線環境問題について考慮する必要がある。特に、地盤振動の発生については車両、軌道、構造物および地盤等の複数の要素が関係しており、総合的な対策が求められる。

これまでにも、車両の走行に伴う騒音および振動を低減するために種々の防振軌道が開発・実用化されてきている^{1) 2) 3)}。例えば、防振スラブ軌道や弾性まくらぎ直結軌道等は、新幹線や在来線において車両が高架橋上を走行する際の構造物音の低減に大きく貢献している。鉄道車両の走行に伴って発生する振動のピーク周波数は、走行速度と車両長から定まる周波数の整数倍の周波数に見られ、一般に新幹線沿線の地盤振動は16～40Hzの帯域が卓越することが知られている⁴⁾。上述した防振軌道の上下方向の1次固有振動数は30Hz以上であり、約40Hz以上の帯域においては周辺に伝播する地盤振動に対する振動低減効果が見込まれるが、それ以下の帯域では振動低減効果が小さくなる傾向にある。よって、さらに広い周波数帯で振動低減効果を得るには、軌道の1次固有振動数を10Hz程度まで低下させることが有効であると考えられる。

現行の軌道構造において、1次固有振動数を10Hz程度まで低下させることが可能な防振軌道としては、コイルばね防振装置を用いたフローティングスラブ軌道^{5) 6) 7)}が挙げられる。フローティングスラブ軌道の構造形式には、軌道スラブにコイルばね防振装置を埋め込む方式(図1)や、コンクリート版上にバラスト軌道を構築してそれらをコイルばね防振装置で支持する方式等がある。

本研究では、コイルばね防振装置を用いたフローティングスラブ軌道について、速度向上時に地盤振動レベルが現状(現行の普通スラブ軌道上を320km/h走行時)以下となる軌道構造(以下、高減衰スラブ軌道)を提案するため、解析的および実験的な検討を行った。ここで、新幹線の走行速度は最大400km/hを想定し、構造物は高架橋を対象とした。はじめに、軌道、構造物および地盤諸元をパラメータとした車両走行解析および地盤振動解析を行い、400km/h走行時に地盤振動レベルが現状以下となる軌道および構造物の条件を検討した。さらに、高減衰スラブ軌道および現行の普通スラブ軌道の実物大軌道供試体を作製して大型起振機による加振試験を

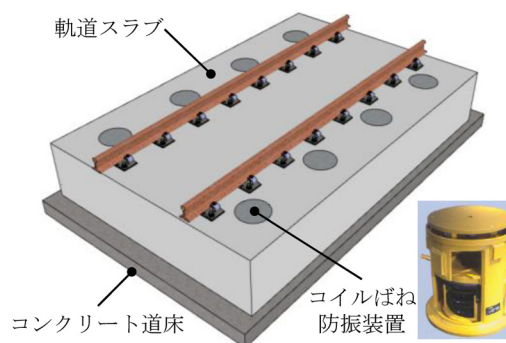


図1 フローティングスラブ軌道の概要

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室
 ** 鉄道力学研究部 構造力学研究室
 *** 防災技術研究部 地質研究室

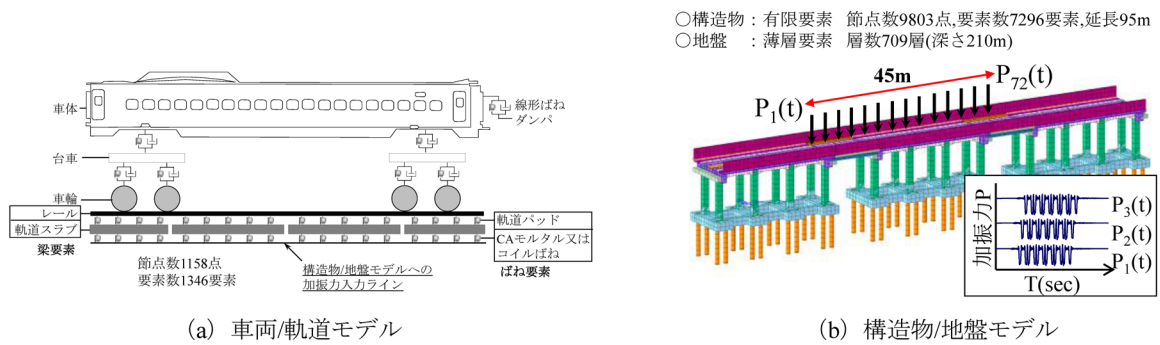


図2 3次元動的応答解析モデルの概要

を行い、実列車荷重相当の作用に対する地盤振動低減効果を確認した。

2. 数値解析による地盤振動レベルの評価

2.1 解析方法

図2に本検討における3次元動的応答解析モデルの概要を示す。本検討では、車両/軌道/構造物(RCラーメン高架橋)/地盤からなる全体振動系を図2(a)に示す加振力入力ラインを境界として車両/軌道モデルと構造物/地盤モデルとに分割し、車両走行による動的応答を評価する手法を用いた。車両/軌道モデルにより加振力を算出する解析には、鉄道総研が開発した車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII⁸⁾を用いた。また、構造物/地盤モデルによる振動解析には、構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3Dを用いた。なお、既往の研究⁹⁾より、本解析手法を用いた車両/軌道モデルによる走行解析および構造物モデルによる振動解析によって、高架橋の動的応答が高精度に再現可能であることが確認されている。

車両モデルは車体、台車および輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパでリンクした3次元力学モデルとし、車両長25m、輪重60kNの一般的な新幹線車両6両をモデル化した。軌道および構造物は有限要素でモデル化し、要素分割はレール締結装置の配置間隔である625mmの1/4の寸法とした。レールおよび軌道スラブは梁要素とし、軌道パッド、CAモルタルおよびコイルばねはばね要素でモデル化した。なお、レールについては営業線で測定した上下方向のレール凹凸量を与えた。構造物はブロック長25mの3径間RCラーメン高架橋と前後のスパン10mの調整桁から構成される(図3)。中間スラブ、張出スラブ、防音壁、縦梁および横梁はシェル要素とし、柱および杭(RC打込み杭)は梁要素、フーチングおよび地中梁はソリッド要素でモデル化した。表1に軌道および構造物モデルの諸元を示す。地盤は薄層要素¹⁰⁾でモデル化し、地盤下方の無限性を模擬するために深さを210mとし、最下層には地盤の質量密度とせ

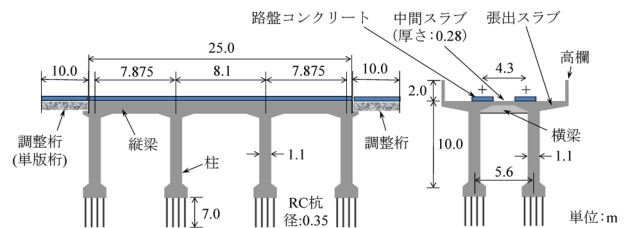


図3 高架橋モデルの概要

表1 軌道および構造物モデルの諸元

構成部材	諸元	
レール	種別	60kg レール
軌道パッド	ばね定数 (MN/m)	30
軌道スラブ	ヤング率 (N/mm ²)	31000
CAモルタル	ヤング率 (N/mm ²)	3500
	厚さ (mm)	50
コイルばね防振装置	ばね定数 (MN/m)	5.3
高架橋コンクリート	ヤング率 (N/mm ²)	25000
調整桁コンクリート	ヤング率 (N/mm ²)	26500

表2 地盤モデルの諸元

深度 (m)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	地盤 A		地盤 B	
			Vs (m/s)	換算N値 今井式*	Vs (m/s)	換算N値 今井式*
0 ~ 2	0.499	16.7	70	0.5	140	4
2 ~ 6	0.499	16.7	80	1	160	5
6 ~ 6.6	0.491	16.7	200	10	250	20
6.6 ~ 7	0.496	16.7	130	3	250	20
7 ~	0.438	16.7	500	154	500	154

※: Vs=89.8N^{0.341}

ん断弾性波速度から決まる底面粘性境界を設けた。表2に地盤モデルの諸元を示す。本解析では、地盤条件として地盤Aと地盤Bの2種類を設定した。地盤Aはボーリングデータに基づくものであり、深さ6mまでのN値は1以下となり、地表層は軟弱な地盤である。地盤Bは、地盤Aの諸元をベースにせん断波速度Vsを2倍程度に増加したものである。なお、N値については、今井らに

表3 解析ケース

解析ケース	走行速度 (km/h)	地盤条件	軌道条件						
			軌道種別	軌道スラブ諸元			軌道スラブ支持方式		上下1次固有振動数 (Hz)
				幅 (m)	長さ (m)	厚さ (m)	支持部材	ばね定数等	
CASE1-1	320	A	普通スラブ	2.34	5	0.19	CAモルタル	2000N/mm ²	240
CASE1-2	320	B	普通スラブ	2.34	5	0.19	CAモルタル	2000N/mm ²	240
CASE2-1	400	A	高減衰スラブ	3.2	25	0.8	コイルばね防振装置	5.3MN/m	5.8
CASE2-2	400	B	高減衰スラブ	3.2	25	0.8	コイルばね防振装置	5.3MN/m	5.8
CASE2-3	400	B	高減衰スラブ	2.34	25	0.6	コイルばね防振装置	5.3MN/m	7.8
CASE2-4	400	B	高減衰スラブ	2.34	25	0.4	コイルばね防振装置	5.3MN/m	9.5
CASE2-5	400	B	高減衰スラブ	2.34	25	0.3	コイルばね防振装置	5.3MN/m	10.9
CASE2-6	400	B	高減衰スラブ	2.34	25	0.19	コイルばね防振装置	5.3MN/m	13.4

より提案されているVsとN値の関係式¹¹⁾から算出した。減衰定数については、普通スラブ軌道および構造物は2%⁹⁾とし、高減衰スラブ軌道は別途実施した小型模型供試体の加振試験の結果から8%とした¹²⁾。また、地盤については後述する地盤振動の実測結果との整合性から、減衰定数を8%として解析を実施した。表3に解析ケースを示す。車両の走行速度については、普通スラブ軌道の場合は320km/h、高減衰スラブ軌道の場合は400km/hとした。また、高減衰スラブ軌道については軌道スラブの幅と厚さをパラメータとした。

2.2 解析結果

本解析では、高架橋の柱基部、軌道中心から12.5m地点および25m地点の3地点を地盤振動の評価点とした。解析結果の評価は、各評価点における1/3オクターブバンド毎の振動加速度レベルで行い、オーバーオール値である「V.A.L.」および振動感覚補正特性 (JIS C 1510-1995) を考慮した振動レベル相当値「V.L.」を求めた。

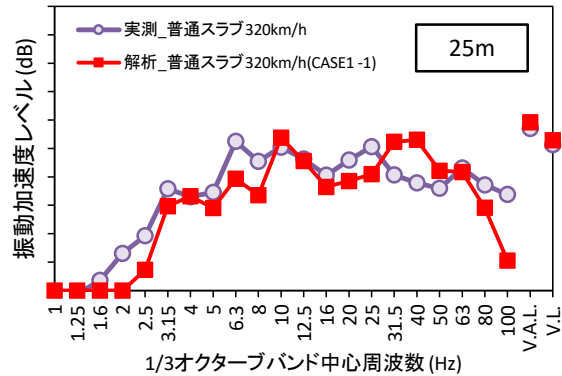
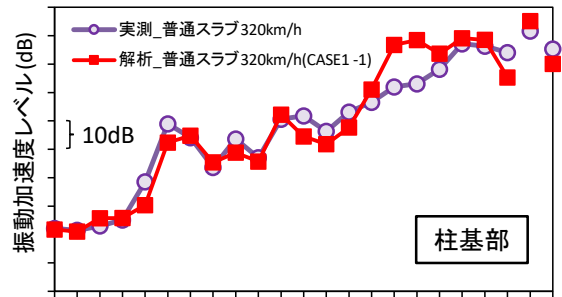
2.2.1 地盤振動の実測結果との整合性

本解析の再現性を確認するために、過去に実施された新幹線走行時の地盤振動の測定結果との比較 (CASE1-1 (普通スラブ軌道・320km/h 走行時) を行った。なお、現地の地盤条件は表2に示す地盤Aである。

図4に実測結果と解析結果の比較を示す。柱基部における比較では、31.5Hz~40Hz付近で実測結果と解析結果が15dB程度異なっているが、車両長に起因する25Hz以下の周波数帯のピークは捉えられており、概ね実測結果を再現できていることが分かる。また、加振点より遠方ほど、低周波数帯において実測結果と解析結果に乖離が生じる傾向であった。これについては種々の要因が考えられるが、その一つとして、本解析モデルでは地盤を薄層要素で成層地盤としてモデル化しており、現地の地盤を完全には再現できていないことが影響していると推察される。

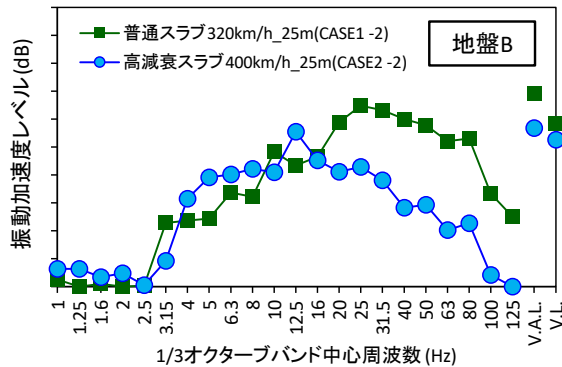
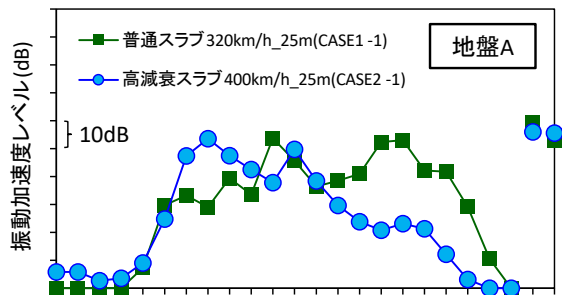
2.2.2 各地盤条件における応答の比較

図5に各地盤条件での25m地点における普通スラブ軌道320km/h走行時(地盤A:CASE1-1, 地盤B:CASE1-2)



※縦軸1目盛り:10dB

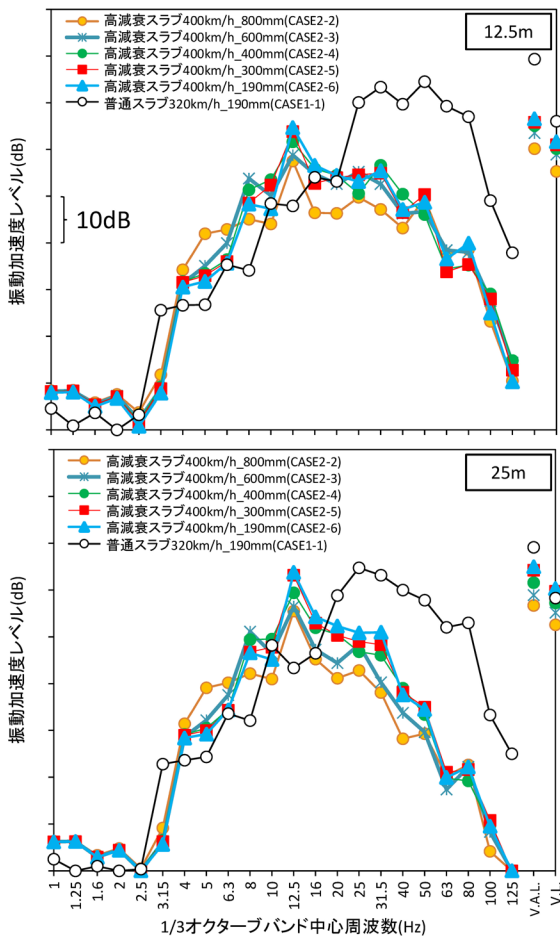
図4 実測結果と解析結果の比較



※縦軸1目盛り:10dB

図5 各地盤条件における比較 (25m 地点)

と高減衰スラブ軌道 (厚さ 800mm) 400km/h 走行時 (地盤 A:CASE2-1, 地盤 B: CASE2-2) の振動加速度レベルの比較を示す。同図より、地盤 A の場合は速度向上時に高減衰スラブ軌道とすることにより、V.A.L. が -3.2dB, V.L. が +2.7dB となり、卓越する応答周波数は



※縦軸1目盛り:10dB

図6 地盤Bにおける軌道スラブの薄型化による比較

10Hz以下となった。一方、地盤Bの場合はV.A.L.が-18.2dB、V.L.が-11.2dBとなり、卓越する応答周波数は10Hz以上に見られた。以上より、高減衰スラブ軌道の軌道スラブの厚さを800mmとした場合、相対的に硬質な地盤Bでは400km/hにおいても地盤振動レベルが現状以下となるが、地盤Aにおいてはこれを達成できないことが分かった。このように、地盤条件によっては軌道の固有振動数を大幅に低下させても、速度向上時に地盤振動を現状以下とすることが困難な場合があり、構造物側での対策も必要になると考えられる。

2.2.3 地盤Bにおける軌道スラブの薄型化による影響

図6に地盤Bにおける高減衰スラブ軌道の軌道スラブの薄型化による影響を示す。12.5m地点については、軌道スラブの厚さが190mm (CASE2-6: 現行の普通スラブと同じ厚さ) の場合においても、V.L.が現状以下となることを確認した。一方、25m地点については、軌道スラブの厚さが400mm (CASE2-4) 以上であればV.L.が現状以下となり、本研究における400km/h走行時の地盤振動低減に関する数値目標を達成できる見通しを得た。

3. 実物大軌道供試体の加振試験による振動特性の評価

3.1 試験方法

前章までの検討結果をもとに、普通スラブ軌道と高減衰スラブ軌道の実物大軌道供試体(約5m)を作製し、大型起振機による定点加振試験により、周辺地盤における振動特性を比較した。表4に構成部材の諸元、図7に計測機器の設置状況、図8に試験状況を示す。高減衰スラブ軌道については、軌道スラブの厚さを400mmとし、レール締結装置間にコイルばね防振装置を配置することで、軌道スラブの幅を普通スラブ軌道と同一の寸法とした。なお、大型起振機の自重(9t)を加味した高減衰ス

表4 構成部材の諸元

構成部材	項目	普通スラブ軌道	高減衰スラブ軌道
レール	種別	60kg レール	
レール締結装置	種別	直結8形レール締結装置	
軌道パッド	ばね定数(MN/m)	30	
軌道スラブ	寸法	4930×2340×190mm	4930×2340×400mm
	設計基準強度(N/mm ²)	40	
CAモルタル	種別	A配合	—
	設計基準強度(N/mm ²)	1.8	—
コイルばね防振装置	ばね定数(MN/m)	—	5.3 (1基あたり)
基礎コンクリート	設計基準強度(N/mm ²)	21	
地盤	N値	0.5～1.5m: 10～20 1.5m以深: 50以上	

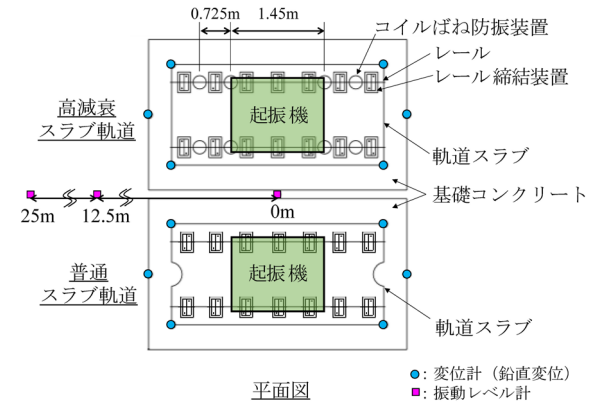
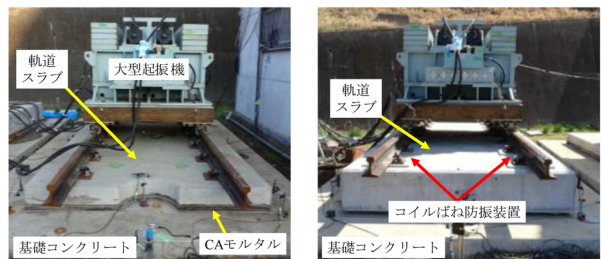


図7 計測機器の設置状況



(a) 普通スラブ軌道 (b) 高減衰スラブ軌道

図8 試験状況

表5 試験ケース

試験ケース	軌道構造	加振力 (kN)	加振周波数 (Hz)
CASE N-1	普通スラブ軌道	±10	2.6~30
CASE N-2	普通スラブ軌道	±30	4.4~30
CASE H-1	高減衰スラブ軌道	±10	2.6~30
CASE H-2	高減衰スラブ軌道	±30	4.4~30

ラブ軌道の固有振動数は7.5Hzである。測定項目は軌道スラブおよび基礎コンクリートの鉛直変位（高感度変位計CDP-25, CDP-50:東京測器研究所社製）、軌道スラブの長手方向に対して加振点近傍の地盤0m, 12.5m, 25m地点の振動レベル（V.L.）（振動レベル計VM-52:リオン社製）とした。

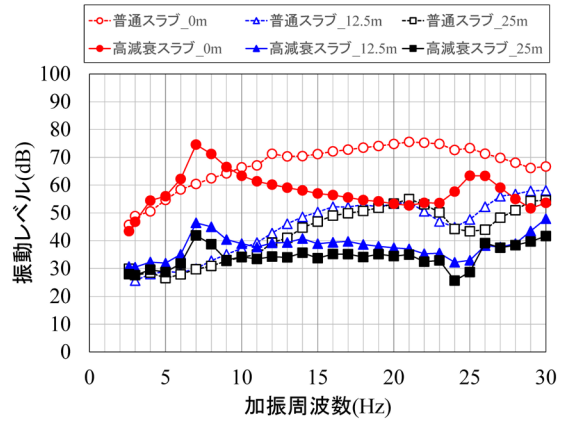
表5に試験ケースを示す。加振力は±10kN, ±30kNの2ケースとした。加振周波数については起振機の性能線図から定まる最低周波数~30Hzとし、正弦波による加振を行った。なお、高減衰スラブ軌道については、加振力±30kNの場合に同軌道の固有振動数(7.5Hz)付近では共振現象により試験を行うことができなかった。よって、加振力±10kNの場合は2.6Hz以降（整数値で）1Hz刻み（2.6,3.0,4.0...30Hz）、加振力±30kNの場合は4.4Hz以降（整数値で）2Hz刻み（4.4,6.0,8.0...30Hz）で加振を行った。

3.2 試験結果

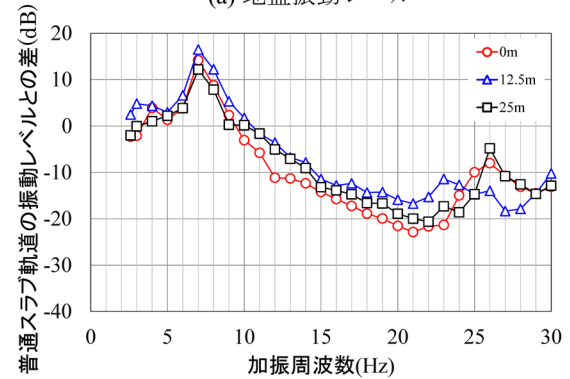
図9および図10に各加振力における試験結果を示す。なお、図中の(a)は地盤0m, 12.5m, 25m地点における加振周波数毎の振動レベル（V.L.）、(b)は同評価点における普通スラブ軌道に対する高減衰スラブ軌道の振動レベルの差を示す。また、図10に示す加振力±30kNの場合における高減衰スラブ軌道の結果については、固有振動数（7.5Hz）付近では共振現象により加振を実施できなかったため、6~9Hz間のデータを不連続とした。

はじめに、各加振力におけるV.L.を比較すると、普通スラブ軌道の場合は20Hz以上の周波数帯でピーク値を示し、高減衰スラブ軌道の場合は固有振動数付近である7Hzで振動レベルがピーク値を示した後、20Hz付近まで緩やかに低下する結果となった。また、両軌道ともに、加振力の増加に伴いV.L.は増加する傾向であった。

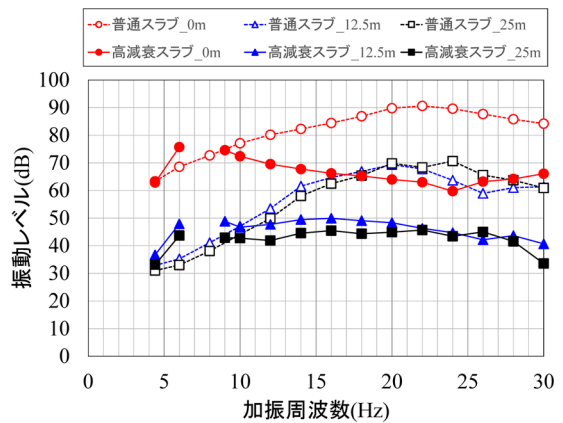
次に、普通スラブ軌道と高減衰スラブ軌道のV.L.の差を比較すると、いずれの評価点においても7Hz付近では高減衰スラブ軌道の共振によりV.L.が増加するが、10Hz以上の周波数帯においては振動低減効果が見られ、20~25Hz付近において最も低減量が大きかった。V.L.の低減量は最大で20~30dBであった。なお、V.L.の評価点における低減量を比較すると、全体的に12.5m地点よりも25m地点の方がやや低減量が大きくなり、その差は加振周波数の増加に伴い大きくなる傾向であった。



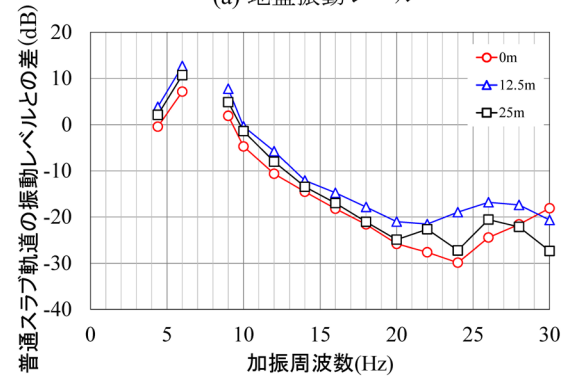
(a) 地盤振動レベル



(b)高減衰スラブ軌道による地盤振動の低減効果
図9 加振力±10kN (CASE N-1, H-1) の結果



(a) 地盤振動レベル



(b)高減衰スラブ軌道による地盤振動の低減効果
図10 加振力±30kN (CASE N-2, H-2) の結果

以上より、大型起振機を用いた定点加振試験の結果、本研究で対象とした高減衰スラブ軌道は現行の普通スラブ軌道に対し、10Hz以上の周波数帯において地盤振動レベルが最大20~30dB低下し、高い地盤振動低減効果を示すことを確認した。10Hz以下の固有振動数付近では応答が増加するが、前章における解析結果より、地表層のN値が4以上の地盤においては卓越する応答周波数が10Hz以上となるため、本軌道を適用することにより400km/h走行時の地盤振動レベルを現状以下とすることが可能になると考えられる。ただし、地盤条件によっては10Hz以下の帯域の振動が卓越する場合があります、沿線の振動に影響を及ぼすことも考えられるため、実際の適用にあたっては、より詳細な検討が必要と考える。

4. まとめ

本研究では、新幹線の更なる速度向上を想定し、コイルばね防振装置を用いた高減衰スラブ軌道を適用することにより、400km/h走行時に地盤振動レベルが現状以下となる条件について解析的および実験的な検討を行った。

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 車両/軌道モデルおよび構造物/地盤モデルからなる3次元動的応答解析モデルにより、車両走行に伴う地盤振動を概ね再現可能であることを確認した。
- (2) 数値解析より、地表層のN値が4程度の比較的軟弱な地盤において、高減衰スラブ軌道の軌道スラブ厚さを400mm以上とすることで400km/h走行時の地盤振動レベルが現状（普通スラブ軌道320km/h走行時）以下となることを確認した。また、地表層のN値が1以下のさらに軟弱な地盤の場合は、構造物側での対策も必要になると考えられる。
- (3) 実物大軌道供試体の定点加振試験より、加振周波数30Hzまでの振動特性を明らかにするとともに、提案する高減衰スラブ軌道は10Hz以上の周波数帯で地盤振動レベルが普通スラブ軌道よりも最大で20~30dB低下し、高い振動低減効果を示すことを確認した。
- (4) 高減衰スラブ軌道の適用により、400km/h走行時の地盤振動が現状以下となる可能性が示唆されたが、地盤条件によっては10Hz以下の帯域の振動が卓越する場合があります、沿線の振動に影響を及ぼすことも考えられるため、実際の適用にあたっては、より詳細な検討が必要と考える。

文献

- 1) 佐藤吉彦, 大石不二夫, 安藤勝敏, 三浦重: 防振G型スラブ軌道の開発実用化, 日本鉄道施設協会誌, Vol.25, No.8, pp.926-928, 1987.12
- 2) 楠田将之, 堀池高広, 安藤勝敏, 須永陽一, 高尾賢一: 着脱式弾性まくらぎ直結軌道(D型弾直軌道)の開発, 第6回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.25-28, 1999.12
- 3) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 吉川秀平: S型弾性まくらぎ直結軌道に対する性能確認試験, 土木学会第72回年次学術講演会, pp.257-258, 2017.9
- 4) 吉岡修, 芦谷公稔: 軌道の支持ばね係数低下が地盤振動低減に与える効果, 鉄道総研報告, Vol.5, No.9, pp.31-37, 1991
- 5) 武居泰, 藤井光治郎, 伊積康彦, 津野究: 開削トンネルから地盤・建物への列車振動伝播性状, 第12回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.553-556, 2005.12
- 6) 桃谷尚嗣, 鈴木健司, 木村和夫, 中島高志, 名村明, 安藤勝敏, 堀池高広: コイルばね防振軌道の走行安全性に関する検討, 第7回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.59-62, 2000.12
- 7) 田中郁夫, 平川正, 鈴木健司: 軌道一体構造となる駅ビルでの個体音対策としての防振軌道の設計と施工, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, pp.195-200, 2011.2
- 8) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995
- 9) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正: 車両/軌道/構造物の各種パラメータが鉄道RCラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.69, No.2(応用力学論文集Vol.16), pp.I_821-I_832, 2013
- 10) 田治見宏, 下村幸男: 3次元薄層要素法による建物-地盤系の動的解析, 日本建築学会論文報告集, No.243, pp.41-51, 1976
- 11) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.89-96, 1975
- 12) 洲上翔太, 高橋貴蔵, 渡辺勉, 桃谷尚嗣: 模型供試体の加振試験による高減衰スラブ軌道の振動特性に関する基礎的検討, 土木学会第71回年次学術講演会, 2017.9