

三次元数値解析モデルによる高速走行時の高減衰スラブ軌道の地盤振動特性

鉄道総研 正会員○渡辺 勉 鉄道総研 正会員 瀧上 翔太 鉄道総研 正会員 野寄 真徳
 鉄道総研 正会員 横山 秀史 構造計画研究所 正会員 三橋 祐太 構造計画研究所 正会員 庄司 正弘

1. はじめに 列車の高速化や新線建設に伴う沿線環境保全のために、列車走行により発生する振動を低減させるための各種対策工が検討されている。本研究では、鉄道 RC ラーメン高架橋を対象として、沿線の地盤振動を数値解析的に評価するために、車両、軌道、構造物、地盤などを振動伝播系のパラメータを任意に評価可能な三次元数値解析モデルを構築した。本研究では現地における実測結果を用いて解析手法の妥当性を実証するとともに、走行速度 400km/h における軌道による対策工の振動特性を解析的に検討したので報告する。

2. 検討手法

2.1 解析手法の概要 図1に三次元数値解析モデルの概要を示す。列車走行による地盤振動を再現するためには、ある程度の延長、幅、深さを持った三次元の解析モデルが必要となる。車両、軌道、構造物、地盤の振動伝播系を一体としてモデル化することは可能であるが、現在の計算機能力ではこのような大規模かつ複雑な現象に対して解を実用的に得られるレベルに至っていないのが実状である。そこで本研究では、車両/軌道系モデルと構造物/地盤系モデルに全体系を分割し、前者のモデルで構造物の加振力を求め、後者に加振力を入力して地盤振動を解析する手法を構築した。

2.2 車両/軌道系モデル 図2に車両の力学モデルを示す。車両/軌道系モデルには、車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を用いた。車両は車両長 25m、輪重 60kN 程度の一般的な新幹線車両 6両編成とした。

軌道は普通スラブ軌道であり、有限要素法でモデル化した。レールおよび軌道スラブははり要素、軌道パッド、CA モルタルはばね要素でモデル化した。なお、後述する高減衰スラブ軌道は、CA モルタルを模擬したばね要素のばね定数にコイルばね相当のばね定数を与えることによりモデル化した。解析モデルの節点間隔は、レールの振動モード形状を適切に再現できるように、レール締結間隔 0.625m の 1/4 とした。軌道延長は 60m である。解析で用いる軌道パッドのばね定数は、既往の実測値を参考に、公称ばね定数の 2 倍の値を使用した¹⁾。

図3にレール頭頂面に与えた軌道変位を示す。列車走行に伴い車輪/レール間の相互作用力が地盤を振動させる加振力となるため、レール凹凸及び軌道変位の設定が非常に重要となる。そこで本研究では、実際の営業線において長さ 1m の測定器を用いて測定したレール凹凸に、別途測定した 10m 分の軌道変位を足し合わせたものを使用した。

2.3 構造物/地盤系モデル 表1に解析に用いた材料定数を示す。構造物/地盤系モデルの解析には、地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3D を用いた。本研究では 1 ブロック長 25m の標準的な鉄道 RC ラーメン高架橋 3 ブロックと 10m の調整桁の合計 95m を対象とした。スラブ、縦梁および横梁はシェル要素、柱ははり要素、フーチングおよび地中梁はソリッド要素、杭ははり要素でモデル化した。また、地盤は薄層要素²⁾でモデル化した。地盤下方の無限性を模擬するために、地盤は深さ 210m モデル化するとともに、地盤の最下層には地盤の質量密度とせん断波速度から決まる底面粘性境界を設けた。

2.4 解析ケース 表2に解析ケースを示す。普通スラブ軌道に加えて近年鉄道総研で開発を進めている高減衰スラブ軌道についても解析を実施した。高減衰スラブ軌道は普

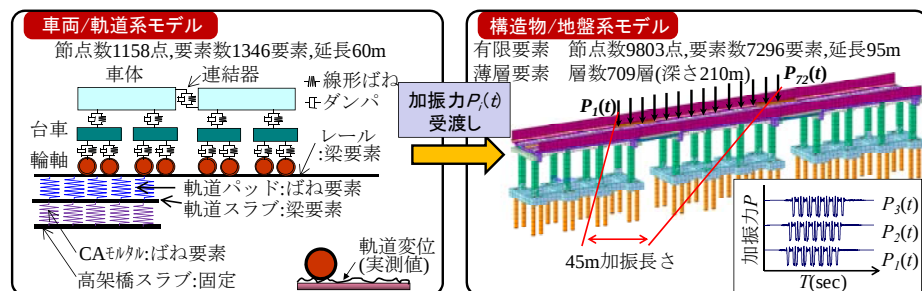


図1 三次元数値解析モデルの概要

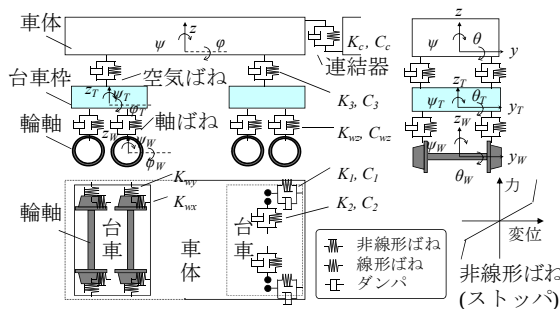


図2 車両の力学モデル

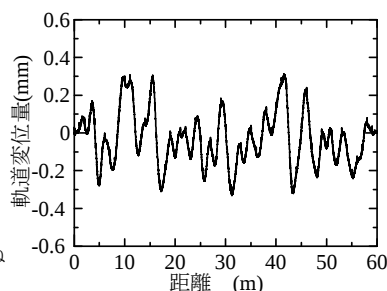


図3 軌道変位

表1 材料定数

(a) 構造物		
レール種別	60kg レール	
軌道パッドばね定数(MN/m)	60(公称値 30)	
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング係数(kN/mm ²)	31
CA モルタル	弾性係数(N/mm ²)	3500
	厚さ(mm)	25
高架橋コンクリート	ヤング係数(kN/mm ²)	26.5
調整桁コンクリート	ヤング係数(kN/mm ²)	25
減衰定数(%)		2.0

(b) 地盤			
地層	深度(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
1	~2.0	1500	70
2	~6.0	1500	80
3	~6.6	1500	200
4	~7.0	1500	130
5	7.0 以深	1500	500
減衰定数: 8%			
ポアソン比 0.49			
単位体積重量: 16.7kN/m ³			

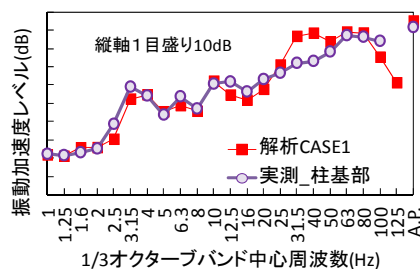
キーワード 地盤振動、鉄道、高架橋、スラブ軌道、対策工、数値解析

連絡先 185-8540 国分寺市光町 2-8-38 南館 211 (公財)鉄道総研 鉄道力学研究部 TEL042-573-7290

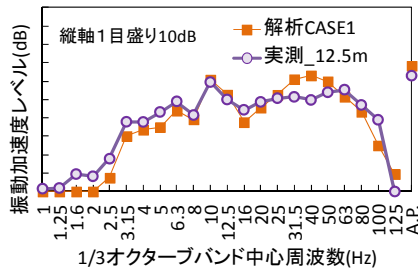
通スラブ軌道に比べて断面および1ユニット長(幅3.2m×高さ0.8m×長さ25m)が大きく、コイルばねで弾性支持することにより軌道の固有振動数を5.3Hzまで低下させた防振スラブ軌道である。なお、現在すでに実用化されたものではなく、研究レベルの防振スラブ軌道である。ただし、コイルばねのばね定数や減衰特性などは別途実施した模型実験の結果を参考に値を決定した。解析における列車速度は320km/h、400km/hとした。

表2 解析ケース

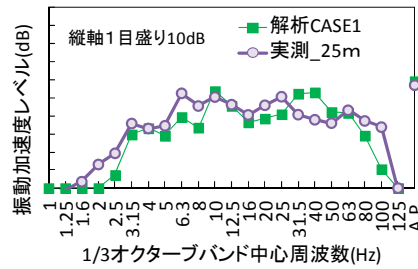
CASE	軌道スラブ	速度(km/h)	軌道スラブ支持ばね剛性	軌道スラブ断面2次モーメント(m^4)	軌道スラブ断面(幅×高さ×長さ)	上下1次固有振動数(Hz)
1	普通スラブ	320	CAモルタル(3500N/mm ²)	1.34×10^{-3}	$2.34 \times 0.19 \times 5.0$	240
2	普通スラブ	400	CAモルタル(3500N/mm ²)	1.34×10^{-3}	$2.34 \times 0.19 \times 5.0$	240
3	高減衰スラブ	320	コイルばね(4.6MN/m)	1.37×10^{-1}	$3.2 \times 0.8 \times 25$	5.3
4	高減衰スラブ	400	コイルばね(4.6MN/m)	1.37×10^{-1}	$3.2 \times 0.8 \times 25$	5.3



(a) 柱基部

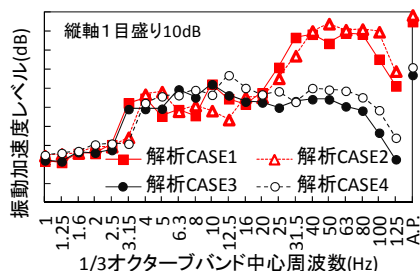


(b) 軌道中心から12.5m地点

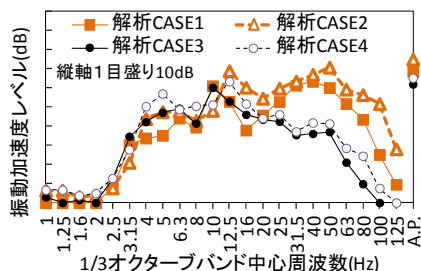


(c) 軌道中心から25m

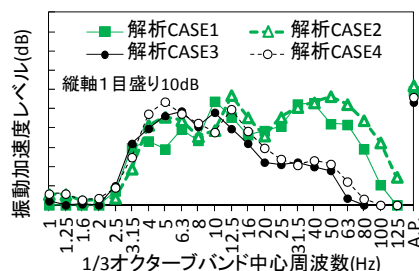
図4 実測結果と解析結果の比較



(a) 柱基部



(b) 軌道中心から12.5m地点



(c) 軌道中心から25m

図5 各ケースの比較

3. 検討結果

3.1 実測との整合性 図4に実測と解析の振動加速度レベルの比較を示す。着目点は、解析モデル中央のラーメン高架橋の柱基部、軌道中心から12.5m点、軌道中心から25m点の3箇所である。なお、地盤振動は振動レベル計VM-52A(リオン)を用いて測定した。同図より、31.5Hz、40Hz付近で実測結果と解析結果に不整合が見られるが、高架橋柱基部における実測を解析で概ね再現できていることがわかる。また、遠方に行くほど低周波域において実測結果と解析結果に乖離が生じている。これらの乖離については種々の要因が想定されるが、本解析モデルの地盤の材料定数を高架橋付近の1点のボーリングデータから決定し、さらにその定数を用いて地盤を薄層要素法で成層地盤としてモデル化したことが原因の1つと推察される。

3.2 パラメータの影響 図5に各ケースの比較を示す。列車速度の影響をみると、CASE2(400km/h、普通スラブ)はCASE1(320km/h、普通スラブ)に比べて、応答のピーク周波数が高周波数側にシフトすることがわかる。具体的には、CASE1における3.15Hz、4Hz帯のピークは、CASE2においては4Hz、5Hz帯にシフト、その他の周波数帯のピークも列車速度の向上に伴って高周波数側にシフトした。これは、車両長25mと列車速度から決まる加振周波数が3.56Hzから4.44Hzに変化するためである。また、軌道構造の影響を見ると、CASE3(320km/h、高減衰スラブ)はCASE1に比べて概ね20Hz以上の周波数域で低減効果が見られる。一方、高減衰スラブ軌道の固有振動数5.3Hzに起因して、4Hz～6.3Hzの周波数帯でCASE1に比べてCASE3は応答が増加することがわかる。

軌道中心から25m地点の振動加速度レベルのオールパス値で比較すると、CASE3はCASE1に比べて5.9dB程度の低減効果が得られた。なお、CASE4(400km/h、高減衰スラブ)とCASE1について、軌道中心から25m地点の振動加速度レベルのオールパス値で比較すると、3.2dB程度の低減効果が得られた。

4. まとめ ①新幹線の標準RCラーメン高架橋沿線の地盤振動を対象とし、車両、軌道、構造物、地盤を任意にモデル化することができ、かつ効率的に数値実験を行うことができる三次元数値解析モデルを構築した。②上記数値解析モデルを用いて、近年鉄道総研において開発が進められている高減衰スラブ軌道を対象に、地盤振動に与える影響を評価した。今後は、軌道構造だけではなく、構造物の対策工等についても検討を行い、新幹線の速度向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献 1) 守田武史、田中靖幸、廣本勝昭、横山秀史、岩田直泰：低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響、土木学会第60回年次学術講演会、pp.221-222、2005 2) 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