

論文 鉄道 RC ラーメン高架橋沿線の地盤振動に関する数値解析的検討

渡辺 勉^{*1}・曾我部 正道^{*1}・横山 秀史^{*2}・三橋 祐太^{*3}

要旨： 鉄道沿線の地盤振動予測は、実測に基づく統計的な方法や実測を援用した数値解析などにより行われる。しかしこれらの手法は新形式の車両、軌道、構造物などには対応が困難である。そこで、上記手法を補完するものとして、各種パラメータを任意にモデル化可能な三次元数値解析モデルを構築した。本モデルにより一般的な鉄道 RC ラーメン高架橋を対象に数値実験した結果、軌道変位は 20Hz 以下の周波数帯で地盤の振動加速度レベル(応答)への影響が小さいこと、16Hz 以下の応答を低減するには部材の剛性増加が有効であること、列車重量を低減すると 100Hz 程度までの周波数帯で応答の低減効果があることなどを明らかにした。

キーワード： 鉄道, RC ラーメン高架橋, 地盤振動, 高速鉄道, 数値解析, 数値実験

1. はじめに

列車走行に伴う地盤振動は、車輪踏面およびレール頭頂面に存在する数 μm オーダーの微細な凹凸や線路方向に波長数 m オーダーの軌道変位などに起因して発生する変動作用力(以下、加振力)が車輪とレールを振動させ、その振動が軌道構造、さらにはそれらを支持する土木構造物に伝わり、地盤へ伝播する非常に複雑な現象である。地盤振動を解析的に再現するためには、伝播過程に介入する膨大なパラメータの影響を適切に評価し、数 Hz から 100Hz を超える高周波数の振動の遠方への伝播を再現可能な大規模な解析モデルが必要となる。近年大型計算機の計算能力が向上し、大規模問題を扱う事例が増えてきているが、特定の列車速度や伝播系の部分的なモデル化など限定的な解釈に留まっているが実態であり、伝播系に介入する各種パラメータの影響を精緻に評価可能でかつ地盤振動を精度よく予測する手法は現在のところ開発されていないのが実状である。実務における地盤振動予測では、実測に基づく統計的予測手法や実測を援用した数値解析等¹⁾によって実施されており、すでに多くの実績をあげている。しかしながらこのような手法では過去に適用事例がなく、実測データが蓄積されていない車両、軌道、構造物、地盤等については適用することが困難である²⁾。

以上のような背景から筆者らは、上記手法を補完する手法として、上記パラメータを任意に取り扱うことのできる三次元数値解析モデルを構築し、地盤振動を解析的に予測する手法の開発をこれまで行ってきた³⁾⁴⁾。この手法は入力パラメータが多岐にわたるため、従来の予測手法や実測との併用が不可欠となるが、各構成要素を任意にモデル化できるため、実際には再現が困難な様々な数値実験が可能となる。本論文では次の内容について検討を行った。

- 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システムを構築する。
- 2) 上記数値解析モデルを用いて、各種パラメータに関する数値実験を実施し、新幹線の標準 RC ラーメン高架橋沿線の地盤振動に与える影響を評価する。

2. 検討手法

2.1 対象構造物

図-1 に対象構造物を示す。対象構造物は、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 の調整桁である。本高架橋は、新幹線の当該路線延長の高架橋のうち約 5 割を占める一般的な形式の構造物である。RC ラーメン高架橋は、径間は 7.875m+8.1m+7.875m、柱断面は 1.1m×1.1m、柱高さは 10.0m、柱中心間隔は 5.6m、中間スラブの厚さは 0.28m、高欄高さは 2m (直壁形)、縦梁断面は 0.85m×1.4m、横梁断面は 0.85×1.3m、路盤コンクリートは 2.5m×0.25m である。基礎形式は杭形式 (RC 打込み杭) で直径 0.35m、長さ 7.0m、本数は 1 柱当たり 13 本である。軌道構造は普通スラブ軌道(RC A-55M)であり、高架橋の路盤コンクリートと軌道スラブの間には高さ調整用の CA モルタルが充填されている。

表-1 に構造物および軌道の各要素の材料定数を示す。これらの定数は設計で用いられる一般的な公称値とした。

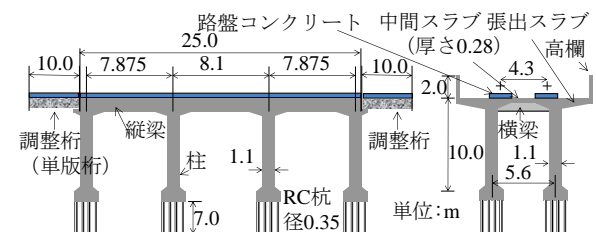


図-1 対象構造物

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博士(工学) (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 博士(工学)

*3 株式会社構造計画研究所 防災・環境部 博士(環境学)

表-1 構造物、軌道の材料定数

材料定数		
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	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)	2000
	厚さ(mm)	50
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%	

表-2 地盤の材料定数

深度 (m)	層厚 (m)	ポアソン比	Vs(m/s)		h (%)
			地盤 A	地盤 B	
0.0 ~ -2.0	2.0	0.498	70	140	8.0
-2.0 ~ -6.0	4.0	0.498	80	160	8.0
-6.0 ~ -6.6	0.6	0.491	200	250	8.0
-6.6 ~ -7.0	0.4	0.496	130	250	8.0
-7.0 ~		0.437	500	500	8.0
地盤の固有周期 ⁶⁾ T _g (sec)			0.34(G3)	0.17(G2)	

※単位体積重量：16.7kN/m³

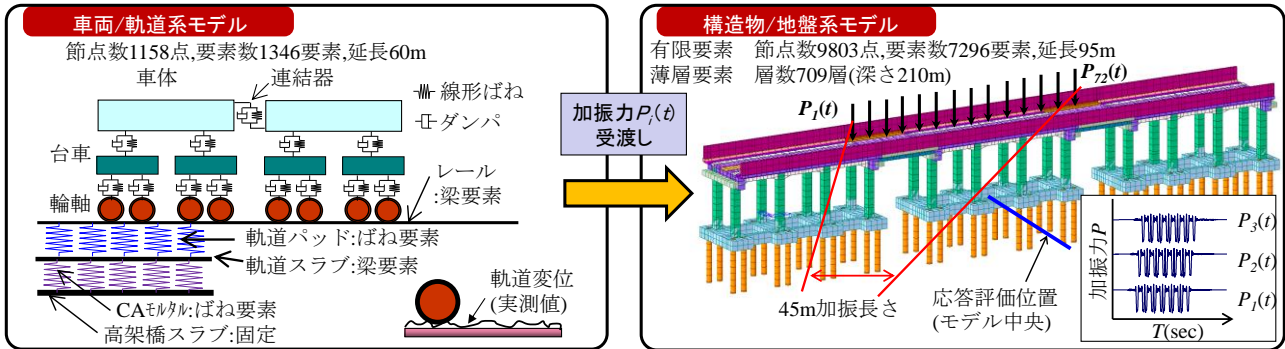


図-2 解析システムの概要

減衰定数は2%とした⁵⁾。表-2に示す地盤の材料定数は、地盤条件の違いの影響を把握するため地盤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の実測に基づく地盤条件(粘性土)であり、地盤Bは地盤Aの定数をベースにせん断波速度(以下、Vs)を2倍程度に増加させたものである。VsとN値の換算式⁶⁾から算定されるN値はいずれの地盤も表層6mまで5未満である。また、地盤の固有周期⁶⁾から求められる地盤種別は地盤AがG3地盤、地盤BがG2地盤である。減衰定数は後述する実測との整合性から8%とした。

2.2 解析手法

(1) 解析システムの概要

図-2に解析システムの概要を示す。列車走行による地盤振動を数値解析により再現するためには、ある程度の延長、幅および深さを持ち、100Hz程度までの振動を再現可能な三次元の解析モデルが必要となる。車両、軌道、構造物、地盤の全体振動系を一体で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解を実用的な範囲で得られるレベルには達していないのが実状である。

そこで本研究では、軌道は概ね100Hz以上の周波数帯で固有振動モードが卓越する一方で、構造物および地盤は100Hzよりも低い周波数帯で固有振動モードが卓越するという、それぞれの卓越周波数に着目し、全体系の振動問題を車両/軌道系と構造物/地盤系の弱連成問題とみなして解析システムを構築することとした。具体的には、車両/軌道系と構造物/地盤系とで全体系を分割し、前者のモデルで車両と軌道の動的相互作用を加味した加振力を求め、これを後者のモデルに入力して地盤振動を解析する手法である。モデルサイズは、波の伝播特性や波長の再現性などを考慮して定めた。このようなモデル化に

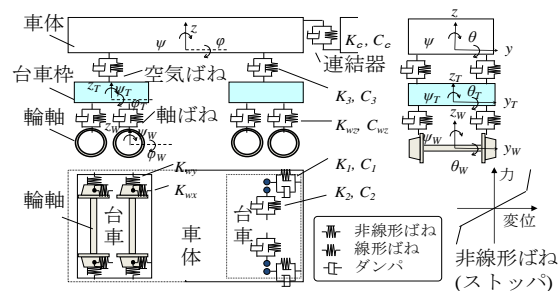


図-3 車両の力学モデル

より、全体系を解析する場合に比べて、解析自由度を大幅に削減することが可能となる。手法の妥当性については後述する実測との整合性や既往の研究^{4),5)}等で実証されている。

(2) 車両/軌道系モデル

車両/軌道系モデルでは、車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS⁷⁾を用いた。

図-3に車両の力学モデルを示す。車両は、車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパーでリンクさせた1車両31自由度(車体5自由度、台車5自由度、輪軸4自由度)を有する三次元モデルとした。列車は、車両モデルを車端に設けたばねK_cとダンパーC_cで連結して構成する。本研究では、車両長25m、台車中心間隔17.5m、軸距2.5m、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。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、左右レール変位と輪

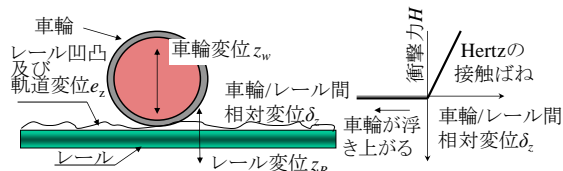


図-4 鉛直方向の車輪とレール間の力学モデル

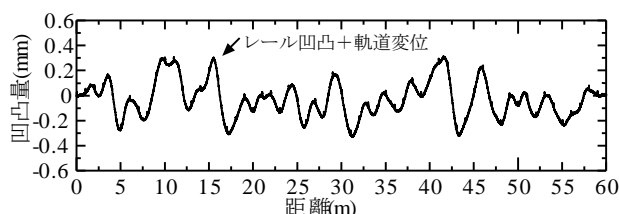


図-5 解析に用いた軌道変位およびレール凹凸

表-3 解析ケース

CASE	列車速度 (km/h)	列車重量	軌道変位 (実測値)	部材剛性		高架橋重量	地盤
				中間スラブ	張出スラブ		
1	320	1倍	考慮	1倍	1倍	1倍	地盤 A
2	320	1倍	考慮	1倍	1倍	1倍	地盤 B
3-1	320	1倍	考慮	100倍	1倍	1倍	地盤 A
3-2	320	1倍	考慮	1倍	100倍	1倍	地盤 A
4	320	1倍	考慮	1倍	1倍	0.1倍	地盤 A
5	320	0.7倍	考慮	1倍	1倍	1倍	地盤 A
6-1~6-25	160~400 (10km/h 刻み)	1倍	考慮	1倍	1倍	1倍	地盤 A
7-1~7-25		1倍	非考慮	1倍	1倍	1倍	地盤 A

重の測定結果から算出した軌道の支持ばね定数の実測値を参考に、公称ばね定数の2倍の値を使用した⁸⁾。このモデルで CA モルタル相当のばね要素の反力を加振力 $P_i(t)$ として構造物/地盤系モデルに受渡すことにより、地盤振動を解析する。また、車輪の走行面には実測したレール凹凸、軌道変位を与えた。表-1 に示した材料定数を与えてモデル化したスラブ軌道の上下1次固有振動数は 240Hz となった。

図-4 に車両/軌道系モデルにおける鉛直方向の車輪とレール間の力学モデルを示す。今回の解析では鉛直方向の振動を主に対象とするため、鉛直方向の構成測について述べる。車輪とレール間の動的相互作用力は、両者の幾何形状と相対変位から接触点及び接触角を求めて算出する。具体的には、相対変位 δ_z は式(1)で、接触力 H は Hertz の接触ばねにより式(2)で表せる。

$$\delta_z = Z_R - Z_W + e_z + ez_0(y) \quad (1)$$

$$H = H(\delta) = H(\delta_z \cdot \cos\alpha) \quad (2)$$

ここで、 Z_R 及び Z_W はそれぞれレールと車輪の接触点における鉛直変位、 e_z はレール凹凸及び軌道変位、 $ez_0(y)$ は接触点の車輪直径の初期接触点からの変動分で、車輪とレールの水平方向相対変位 y の関数として表わされる。

図-5 に解析に用いた軌道変位およびレール凹凸を示す。列車走行に伴い車輪レール間の作用力が地盤を振動させる加振力となるため、軌道変位およびレール凹凸が非常に重要となる。今回の解析では、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。以下で用いる軌道変位はレール凹凸を含んだものとする。

(3) 構造物/地盤系モデル

構造物/地盤系モデル数値解析では、構造物と地盤の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3D を用いた。

※地盤定数は表-2 参照

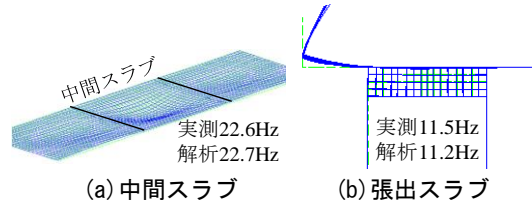


図-6 部材の振動モードの例

構造物については中間スラブ、張出スラブ、防音壁、縦梁および横梁はシェル要素、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。なお、表-1 に示した材料定数を与えてモデル化した高架橋の部材振動モードについては文献 5), 9) に詳細にまとめられているので詳細は割愛するが、例えば図-6 に示すように、中間スラブはスラブ中央が太鼓の腹のように変形する振動モード、張出スラブは全体が変形する振動モードなどを有する。

地盤については薄層要素¹⁰⁾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 とするとともに、地盤の最下層には地盤の質量密度と V_s から決まる底面粘性境界を設けた。今回のモデルでは高架橋 3 ブロックと 2 つの調整桁をモデル化した。なお、図-2 に示すように加振点は計算負荷軽減の観点からモデル中央の 72 点(中央の高架橋 1 ブロック+調整桁 2 連)としているが、事前の検討により、モデル中央の応答評価位置において、高架橋 3 ブロックすべてを加振した場合と比べて応答にほとんど違いが見られないことを確認している。

(4) 解析ケース

表-3 に解析ケースを示す。列車重量、地盤条件、部材剛性(中間スラブ、張出スラブ)、高架橋の重量、列車速度、軌道変位などのパラメータに着目し、それぞれが地盤振動に及ぼす影響に関する数値実験を実施した。列車重量については車体、台車、輪軸の各重量を 70% に低減した。地盤条件については、地盤 A と地盤 B を比較し

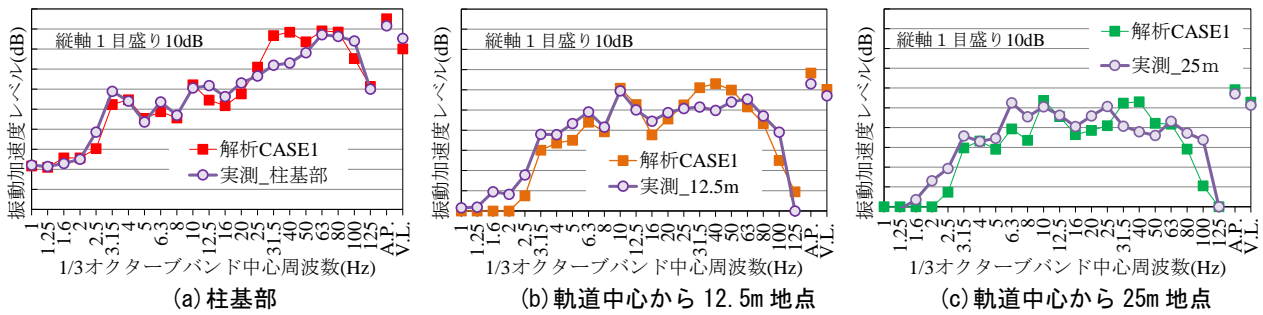


図-7 地盤の振動加速度レベルに関する実測結果と解析結果の比較 (速度 320km/h)

た。部材の剛性については、張出スラブおよび中間スラブの剛性を 100 倍として解析を行った。高架橋の重量についてはコンクリートの単位体積重量を 0.1 倍に設定して解析を行った。列車速度については 160km/h から 400km/h までの速度において 10km/h 刻みに解析を行った。軌道変位については、現地で実測した軌道変位を考慮しない平滑な面を走行するものとして解析を行った。

(5) 解析結果の妥当性の評価方法

解析手法の妥当性の評価は、実測(表-2における地盤 A)との比較により行った。実測と解析は 1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベルで比較した。地盤振動の測定は振動レベル計 VM-52A(リオン)を、データレコーダーは SONY PC-216 を用いて実施した。なお、以降の「応答」は振動加速度レベルを指すものとする。

3. 検討結果

3.1 実測と解析の整合性

図-7に実測と解析の比較を示す。列車速度は 320km/h である。同図には各周波数帯の振動加速度レベルのオールパス値(A.P.), JIS C 1510 に基づき人体感覚補正を行った振動レベル(V.L.)も併せて示した。同図より、車両長 25m と列車速度から決まる加振に起因する応答のピーク ($(320/3.6)/25 \div 3.5\text{Hz}$) やその整数倍のピーク ($3.5 \times 3 = 10.5\text{Hz}$) など、解析により実測を概ね再現できていることがわかる。また、概ね 16Hz より高周波数側では振動が大きく減衰しているが、5~12.5Hz の周波数帯では振動の減衰が小さいことがわかる。ただし、31.5Hz, 40Hz 付近や遠方に行くほど低周波域において実測と解析に乖離が生じている。これらの原因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 各種パラメータの影響

(1) 地盤条件の影響

図-8 に柱基部および軌道中心から 12.5m 地点における振動加速度レベルに対する地盤条件の影響を示す。柱基部の応答は 16Hz 程度までは両者にほとんど差がないが、それより高周波数側では応答に違いが生じている。

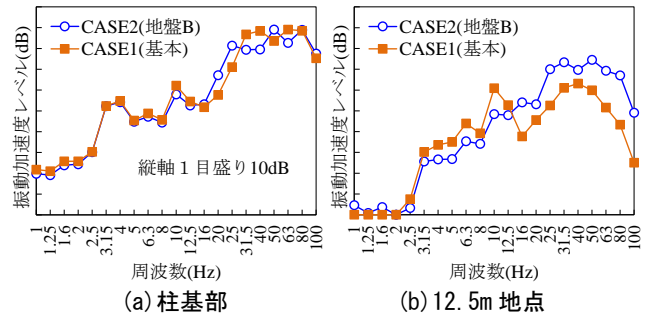
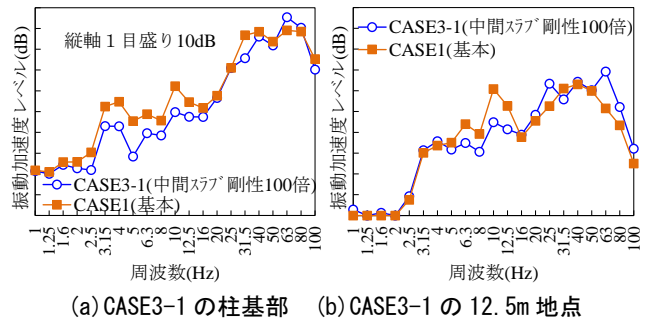
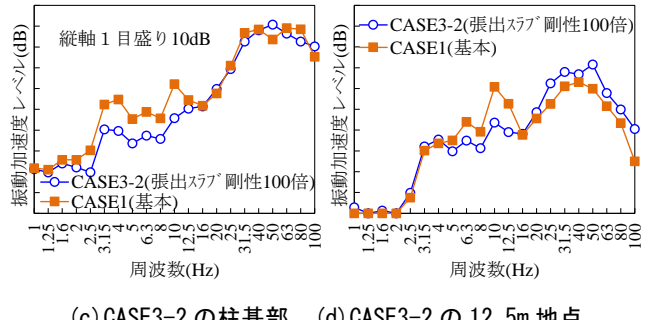


図-8 地盤条件の影響 (320km/h)



(a) CASE3-1 の柱基部 (b) CASE3-1 の 12.5m 地点



(c) CASE3-2 の柱基部 (d) CASE3-2 の 12.5m 地点

図-9 部材剛性の影響 (320km/h)

これは、地盤と構造物の相互作用の影響であると推察される。一方で、12.5m 地点の応答を見ると、相対的に地盤が軟弱な地盤 A の方が概ね 16Hz 以下の周波数域で地盤 B に比べて応答が大きく、16Hz 以上では応答の大きさが逆転し地盤 B の方が応答が大きくなる。今回の解析では 2 ケースのみの比較であるが、実際には地盤のパラメータ(層構造, Vs, 減衰定数)は膨大であるため、地盤条件の影響の検討はさらなる深度化が必要であり、今後の課題としたい。

(2) 部材剛性の影響

図-9 に柱基部および軌道中心から 12.5m 地点におけ

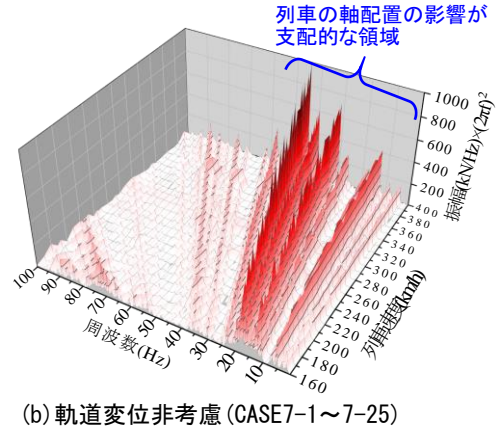
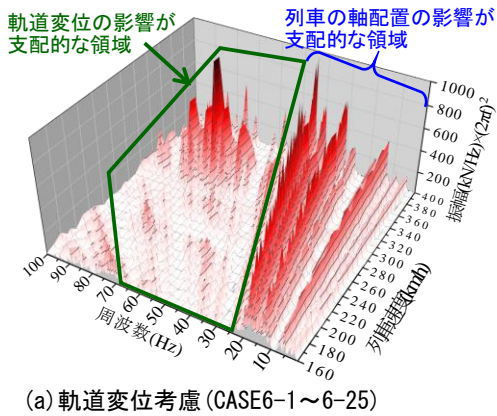
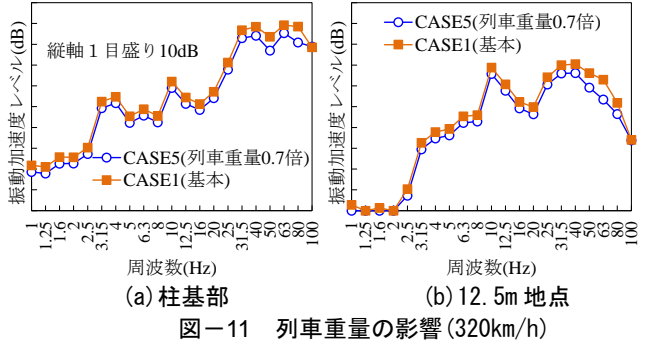
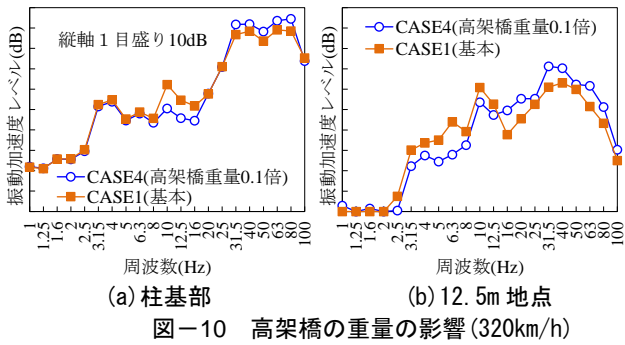


図-12 列車速度が加振力に及ぼす影響

る振動加速度レベルに対する部材剛性の影響を示す。中間スラブおよび張出スラブのように面部材で振動しやすい部材の剛性を基本ケースの100倍に設定すると、柱基部では基本ケースに比べて16Hz以下の周波数帯で応答が低減されることがわかる。これは部材の高剛性化により図-6に示した振動モードが高周波数側にシフトしたためである。このことから、16Hz以下の周波数帯の地盤振動を低減させるために、部材の補強が有効である可能性があると考えられる。また、12.5m地点では応答が増加する周波数帯もあるが、これは部材の剛性が増加したことにより、各部材の固有振動数が高周波数側にシフトしたためであると推察される。

(3) 高架橋の重量の影響

図-10に柱基部および軌道中心から12.5m地点における振動加速度レベルに対する高架橋の重量の影響を示す。高架橋の重量を低減すると基本ケースに比べて応答が低減する周波数帯と増加する周波数帯があることがわかる。12.5m地点をみると、3~12.5Hzでは高架橋の重量を低減すると応答が低減する一方で、16Hz以上の周波数帯では応答が増加する結果となった。

(4) 列車重量の影響

図-11に柱基部および軌道中心から12.5m地点における振動加速度レベルに対する列車重量の影響を示す。当然のことながら列車が軽く(今回は基本ケースの0.7倍)なれば加振力が小さくなるため、全周波数帯で応答が低減することがわかる。具体的には、12.5m地点の63Hz帯で最大9.5dB、全周波数帯の平均では柱基部で3.5dB、

12.5m地点で3.9dBの応答低減効果があることがわかる。

(5) 列車速度および軌道変位の影響

図-12に列車速度が加振力に及ぼす影響を示す。軌道変位の有無によらず、車両長、台車中心間隔、軸距など規則的な列車の軸配置から決まる加振ピークは速度の増加とともに高周波数側にシフトすることがわかる。また、同図(a)において概ね列車速度300km/h以上で50~90Hzの周波数帯で加振ピークが見られるが、これは同図(b)との比較により軌道変位の影響であると考えられる。

図-13に列車速度が12.5m地点の応答に及ぼす影響を、図-14に代表4速度における軌道変位が12.5m地点の応答に及ぼす影響を示す。12.5m地点の応答についても加振力と同様に、列車の軸配置の影響が支配的な領域と軌道変位の影響が支配的な領域が存在することがわかるが、それぞれの領域の境界が加振力の場合に比べて低周波数側にシフトした。図-14により、軌道変位の影響が現れる周波数帯は速度によらず概ね20Hz程度以上の周波数帯であることがわかる。このことから、20Hz以上の地盤振動を適切に再現するためには、軌道変位のモデル化が必要不可欠であることを示している。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 新幹線の標準RCラーメン高架橋沿線の地盤振動を再現可能で、かつ車両、軌道、構造物、地盤を任意にモデル化可能な三次元数値解析システムを構築した。各種パラメータに関する数値実験を実施した結果、

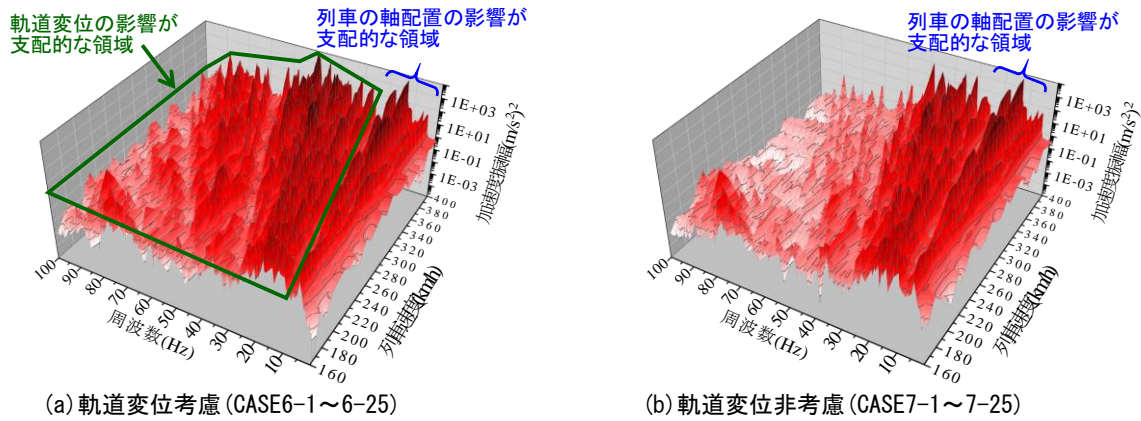


図-13 列車速度が 12.5m 地点の応答に及ぼす影響

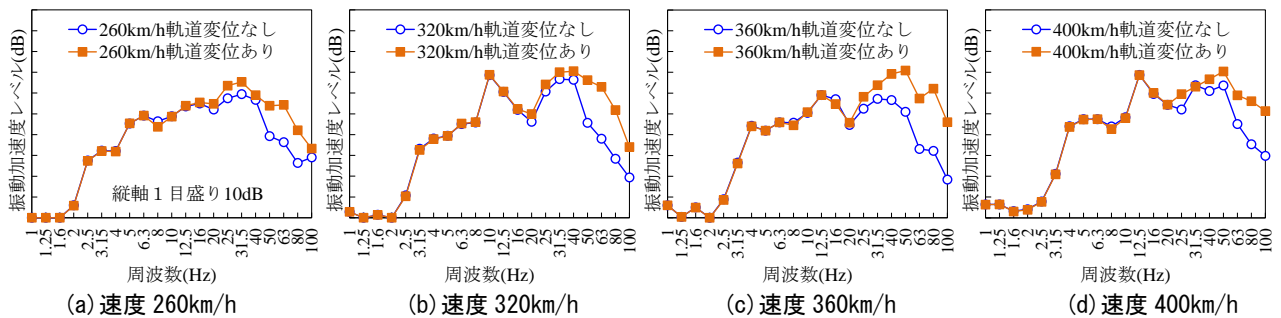


図-14 軌道変位が 12.5m 地点の応答に及ぼす影響 (CASE6 と CASE7 の比較)

- 2) 地盤条件を変更すると、12.5m 地点の応答において相対的に地盤が軟弱な条件の方が概ね 16Hz 以下の周波数帯で相対的に地盤が硬質な条件に比べて応答が大きく、16Hz 以上では応答の大小が逆転し相対的に硬質な地盤の方が応答が大きい傾向を示した。
- 3) 中間スラブや張出スラブの剛性を増加させると、概ね 16Hz 以下の周波数帯の応答が低減された。
- 4) 高架橋の重量を減少させると、基本ケースに比べて応答の増減が見られたが、12.5m 地点でみると 12.5Hz より低周波数帯では応答が低減する結果となった。
- 5) 列車重量を低減すると、全周波数帯の応答低減に寄与することがわかった。
- 6) 速度-周波数-応答の 3 次元マッピングで応答の全体像を可視化した結果、加振力および応答ともに列車の軸配置の影響が支配的な領域と軌道変位の影響が支配的な領域が存在することがわかった。特に、列車速度によらず、軌道変位は 20Hz 以下では振動加速度レベルにほとんど影響を与えない傾向となった。

今後は地盤のパラメータ(層構造, Vs, 減衰定数など)についても引き続き検討の深度化を行う予定である。

参考文献

- 1) 吉岡修：等価起振力法による地盤振動の予測解析，鉄道総研報告，Vol.10, No.2, pp.41-46, 1996.2
- 2) 野寄真徳，横山秀史：列車走行にともなって沿線に生じる振動を予測する，Railway Research Review, Vol.74, No.10, pp.24-27, 2017.2

- 3) 横山秀史，伊積康彦，渡辺勉：3 次元振動解析による地盤および建物振動予測シミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.29, No.5, pp.41-46, 2015.5
- 4) 渡辺勉，曾我部正道，横山秀史，山崎貴之：高速鉄道トンネル上の地盤振動に関する解析的検討，鉄道力学論文集，Vol.18, pp.107-114, 2014.7
- 5) 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), I_821-I_832, 2013.3
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，pp.270, 2012.9
- 7) 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
- 8) 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, 2005.9
- 9) 松岡弘大，貝戸清之，渡辺勉，曾我部正道：走行列車荷重を利用した RC 鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握，土木学会論文集，Vol.67, No.3, pp.545-564, 2011.2
- 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.