平成20年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第65号

鉄道高架橋周辺地盤振動解析および振動軽減対策検討

Ground vibration analysis around Shinkansen viaducts and discussion on mitigation methods

北海道大学工学部　○学生員　松崎徹哉 (Tetsuya Matsuzaki)
北海道大学大学院工学研究科　正　員　何　興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学研究科　フェロー　林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
神戸大学大学院工学研究科　フェロー　川谷充郎 (Mitsuo Kawatani)
北海道大学大学院工学研究科　正　員　松本高志 (Takashi Matsumoto)

1.　まえがき

近年，都市化の進展に伴い，鉄道高架橋の周辺に建物が隣接する場合の増加や，列車の更なる高速化により，鉄道特に新幹線高架橋の周辺では，列車走行に引き起こされる地盤振動問題が注目されている。列車が高架橋を走行する際に発生する周辺地盤振動の伝播メカニズムは非常に複雑で，振動軽減対策を含め，まだ完全に解明されていない事項が多い。既往の研究内容の多くは，地盤振動実測データに基づく統計分析報告 [1), 2)]である。しかし，現状の実測値から新しい地盤振動軽減対策工法の導入効果および将来の列車速度向上に伴う地盤振動値を予測することは，精度上課題があった。そのため，地盤振動の予測・評価さらに振動対策考案に用いられる精度の高い解析的手法を構築する必要がある。

そこで著者らは，鉄道高架橋の振動特性を正確に把握するために，固有振動数や加速度応答が測定された鉄道高架橋の事例をもとに，列車と鉄道高架橋との連成を考慮した動的応答解析手法 [3)]を構築した。さらに構築した連成振動解析手法を応用した高速鉄道高架橋周辺地盤振動の解析も行っている [4), 5)]。本研究では，構築した解析手法を用い，鉄道高架橋周辺地盤振動の再現および軽減対策の考案さらにその低減効果の検討を行う。具体的には，走行列車－橋梁および基礎構造物－地盤の動的相互作用を考慮した地盤振動解析手法およびその妥当性を評価した上で，高架橋の振動特性を反映した簡易振動軽減対策を考案し，その低減効果を解析的に検証することを目的とする。

2.　解析手法

2.1 橋梁－列車連成振動解析 [3)]

本研究では，列車走行による鉄道高架橋の振動解析において，橋梁部分を三次元有限要素でモデル化し，モード法により定式化を行う。新幹線車両を三次元質点－ばね振動系としてモデル化する。そして走行車両と橋梁との連成振動微分方程式を Newmark's β 法を用いて逐次積分をして動的応答解析を行う。このとき，各時間間隔内で加速度の変化をコントロールするパラメータ $\beta=1/4$ とし，各時間間隔における収束判定は 1/1000 とする。モード解析における考慮する最高振動数は，走行列車の速度が非常に高速であることから，ある程度高周波の影響を考え，100Hz とする。また，各橋脚下端部における動的地盤反力について，その影響地マトリックス [3)]を用いて計算を行う。

2.2 地盤振動解析

列車走行による高架橋振動が引き起こす周辺地盤振動について，列車－橋梁連成振動解析において求めた橋脚下端部地盤反力を加振力としてフーチングと杭で構成される基礎構造物に入力し，薄層要素法に基づく地盤－構造物動的相互作用解析プログラム SASSI2000[6)]を用いて地盤振動解析を行う。SASSI2000 では，線形地盤－構造物相互作用問題に対し，サブストラクチャー法を用いて解析対象全体を幾つかのサブシステムに分割し，サブシステムごとに解を求めた後に重ね合わせの原理を適用して全体の解を求める。

3.　解析モデル

3.1 高架橋及び軌道モデル

対象とする鉄道高架橋は，一般的な形式である 1 層 2 柱式 3 径間の鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で，列車走行時の高架橋および周辺地盤振動応答が実測 [3)]された箇所をモデル化する。高架橋本体は 1 ブロック単位で構造的に独立しているが，連続する複数のブロックは，橋軸方向に軌道構造で繋がっている。そのため，検討対象とする 1 ブロック 24 m の高架橋の両側に各 1 ブロック配置し，計 3 ブロック 72 m について Fig. 1 に示すような一節点 6 自由度を有する三次元はり要素にモデル化し，質量は節点集中質量とする。軌道構造についても同じく三次元はり要素でモデル化し，軌道狂いを高低狂いのみ考慮し，その実測値を用いる。軌道支持部としてのマクラギとバラストの弾性効果を表現するために，マクラギ位置下端に二重節点 [3)]を定義し，回転を除いた各方向にばねを設ける。この結果，検討対象とする鉄道高架橋への走行列車の進入および退出における軌道の影響つまり端部境界条件を考慮することが可能となる。橋脚下端部に，基礎および地盤の影響を考慮するため二重節点を定義し，地盤ばねを設ける。高架橋モデルの減衰については，レイリー減衰を用いて評価し，類似鉄道高架橋を対象とした既往の振動試験結果より，1 次と 2 次振動モードに対して減衰定数を 0.03 とする。更なる橋梁モデル諸元などの詳細は，参考文献 [3)]に参照できる。

Fig. 1 において，Point-1，Point-2 および Point-3 はそれぞれ中央ブロックの張出し端部，第一橋脚の上および第三橋脚の上のポイントを表し，これらの箇所について橋梁応答を評価する。また，L-1～L-4 および R-1～R-4 は中央ブロックの計 8 本橋脚の下端部を表す。

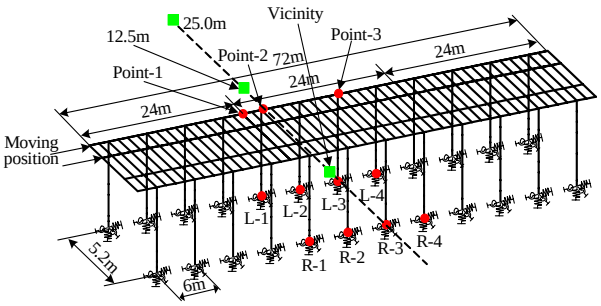

Fig. 1 Finite element model of the bridge

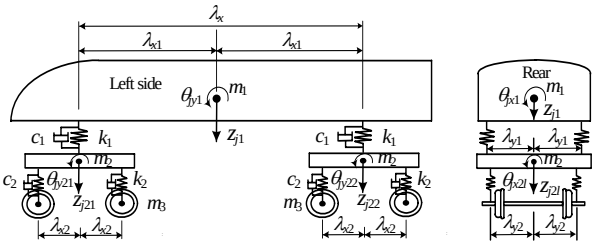

Fig. 2 Nine-DOF car model

Table 1 Variants employed in train model

Definition (j^{th} car)	Variants
Bouncing of car body	z_{j1}
Parallel hop of front bogie	z_{j21}
Parallel hop of rear bogie	z_{j22}
Rolling of car body	θ_{jx1}
Axle tramp of front bogie	θ_{jx21}
Axle tramp of rear bogie	θ_{jx22}
Pitching of car body	θ_{jy1}
Windup of front bogie	θ_{jy21}
Windup of rear bogie	θ_{jy22}

Table 2 Dynamic properties of moving trains

Mass (t)	m_1 (Body)	32.818
	m_2 (Bogies)	2.639
	m_3 (Wheels)	0.9025
Spring constant	k_1 (Upper)	8.86×10^5
k (N/m)	k_2 (Lower)	2.42×10^6
Damping coefficient	c_1 (Upper)	4.32×10^4
c (N･s/m)	c_2 (Lower)	3.92×10^4
Natural frequency	f_u (Upper)	1.07
(Hz)	f_l (Lower)	7.41

Table 3 Properties of footings

Unit mass (t/m^3)	Young's modulus E (kN/m^2)	Poisson's ratio ν	Damping constant
2.50E+06	25	0.2	0.05

3.2 走行列車モデル

本研究では，高架橋の鉛直方向の振動応答に寄与する車体および台車の振動を考慮した Fig. 2 に示す 9 自由度の三次元車両モデルを用いる。車両モデル自由度の定義および動的諸元をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。車両の定式化および振動方程式，さらに橋梁との動的相互作用の詳細は，参考文献[3]に参考されたい。

本解析では，実測状況に対応する 16 両編成の新幹線列車をモデル化し，走行速度は実際の運行速度 270km/h とし，走行位置(Moving position)は Fig. 1 に示す下り線に相当する位置とする。また，本検討対象は，最高速度での走行が可能な直線区間の高架橋であることから，車輪質量の鉛直方向加速度による慣性力を考慮せず，車輪は接触点におけるレールと変位を共有させる。

3.3 基礎構造物モデル

橋脚一本に対し，フーチングと 7 本の杭からなる基礎構造物を，Fig. 3 に示すソリッド要素およびはり要素でモデル化する。杭は長さ 18m(Type1，5 本，○位置)および 7m(Type2，2 本，×位置)の 2 種類で構成されている。フーチングと杭の諸元は，Table3 と Table4 にそれぞれ示す。ここで，解析容量の関係で，ある照査点における地盤応答は 24 セットの基礎構造物をそれぞれ加振して得られる応答を重ね合わせして算出する。

3.4 地盤モデル

高架橋周辺の地盤特性は Table 5 に示す。解析においては，3 種類の地層からなる地盤を Fig. 4 に示す 21 層からなる薄層要素でモデル化する。各層の厚さはその層における S 波波長の 1/5 以下になるように分割している[7]。杭下端が到達する深さまで薄層要素を設け，その下はプログラムで自動的に付加する地層と粘性境界を用いて半無限空間を表現している。

3.5 振動軽減対策工

著者らの先行研究[3]において，上述高架橋で構造的にフリーな状態である張り出し部における振動応答が最も卓越している現象を確認し，この部分を補強することにより，橋梁さらに地盤の振動を低減できると考え，張り出し部に対する簡易補強工法を考案した。補強方法は，Fig. 5 に示すようにストラットで補強する方法を考える。ストラットで補強の場合，補強材は橋脚と比べて約 1/2 程度の剛性を持った H 型鋼と想定する。補強材と高架橋の接合条件は剛結合とする。

4. 解析結果および応答評価

4.1 解析手法の妥当性検証

本解析手法の妥当性について，著者らの既往研究において詳細に検討してきた。そのため，妥当性についての詳細は参考文献[3]に参照されたい。また，モデル化に起因する比較的に顕著となる張出し部応答の差異に関しては，参考文献[3]で詳細に論じている。

4.2 振動軽減効果検証

4.2.1 高架橋応答

補強前と補強する場合の高架橋鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトルを Fig. 6 に示す。ストラットで補

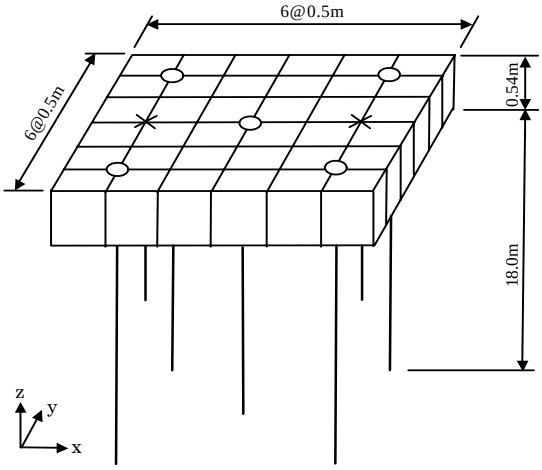

Fig. 3 Substructure model

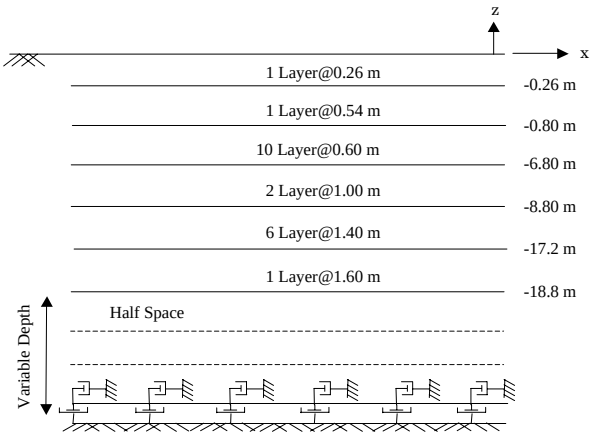

Fig. 4 Site model with layer elements

Table 4 Properties of piles

Type	1	2
Unit mass (t/m^3)	2.50E+06	2.50E+06
Cross-section area A (m^2)	0.058	0.045
Young's modulus E (kN/m^2)	3.50E+07	3.50E+07
Moment of inertia I (m^4)	6.22E-04	3.50E-04
Poisson's ratio ν	0.2	0.2
Damping constant	0.05	0.05

Table 5 Ground properties

Depth of stratum (m)	0–6.8	6.8–17.2	17.2–
Unit mass (t/m^3)	1.6	1.8	2.0
Shear modulus G (kN/m^2)	10400	66300	250000
Poisson's ratio ν	0.49	0.49	0.49
S wave velocity *Vs* (m/s)	80	190	350
Damping constant	0.05	0.05	0.05

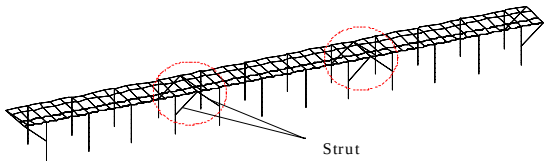

Fig. 5 Depiction of reinforcement with steel struts

強の場合，加速度振幅は小さくなっている。特に 10 Hz から 30 Hz 付近のフーリエ振幅が小さくなっている。張り出し構造部に近く影響を受けやすい Point-2 では加速度振幅は小さくなっているが，Point-3 では加速度振幅は補強前後であまり変化がない。このように，橋軸方向に張り出し構造を持つ高架橋では，張り出し構造部の剛性を高めることにより，高架橋の振動特性の改善効果が得られる。高架橋自体の振動特性が改善されることで，周辺への振動低減に繋がると考えられる。

4.2.2 地盤応答

補強前と補強する場合の周辺地盤鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトルを Fig. 7 に示す。高架橋応答の傾向と同じように，補強する場合加速度の振幅は，補強前より減少している。振動数成分において，高い領域より低周波部分のフーリエ振幅の減少が顕著である。これは，本来フリー状態の張り出し部の剛性を高めることにより，卓越していた低周波振動成分が抑えられた結果であると考えられる。

このように得られたこれらの知見は，本連成解析手法の高架橋および周辺地盤振動軽減対策検討への有用・有効性を示すものである。

5.　あとがき

本研究では，三次元高架橋および列車モデルを用い，列車－橋梁さらに基礎構造物－地盤の動的相互作用を考慮できる，基本的な鉄道高架橋周辺地盤振動の予測・評価および軽減対策の考案さらにその低減効果の検討を行う解析手法を構築した。そして高架橋の振動特性を反映した簡易振動軽減対策を考案し，その軽減効果を解析的に検証し，本解析ツールの有用・有効性を示した。

その一方，本研究では高架橋および地盤振動の鉛直成分に着目し，　9自由度走行列車モデルを用いた。これは，保守状況の良い直線区間において有効である。しかし，車輪は接触点におけるレールと変位を共有するものとしているため，車輪・レール間に生じるクリープ力やフランジ衝突現象といった車輪とレールとの接触による相互作用を考慮できていない。曲線区間などにおいて，車両の水平振動による橋梁の応答も無視できないと考えられ，この車輪とレールとの接触も適切に考慮する必要があり，すなわちさらに厳密な車両モデルが必要である。そこで本研究では，Fig. 8に示す車輪とレールとの接触も考慮に入れる31自由度の三次元車両モデルを構築し，より汎用的な地盤振動解析方法の開発を行っている。

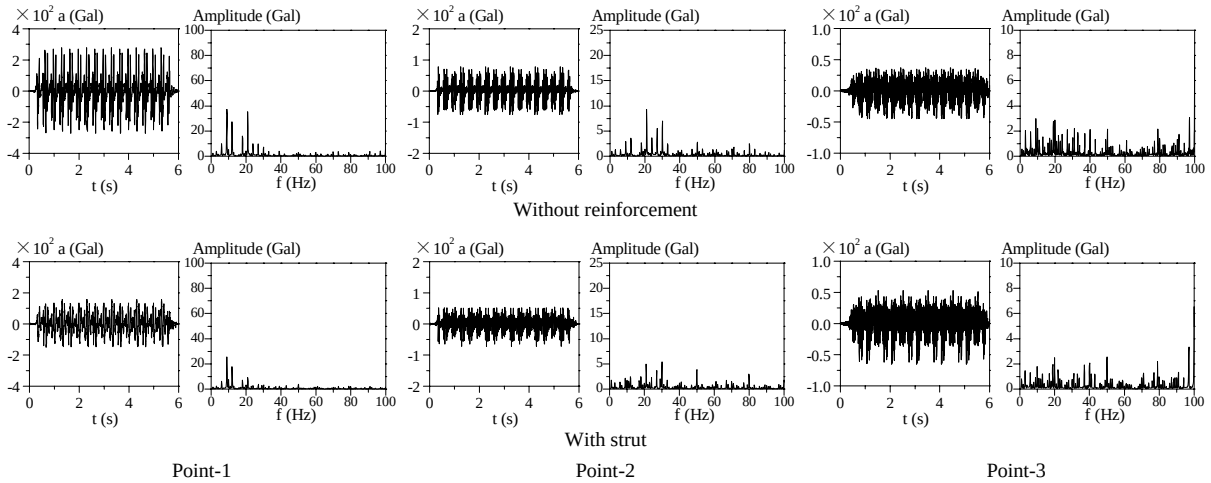

Fig. 6Bridge acceleration response (Train speed 270 km/h)

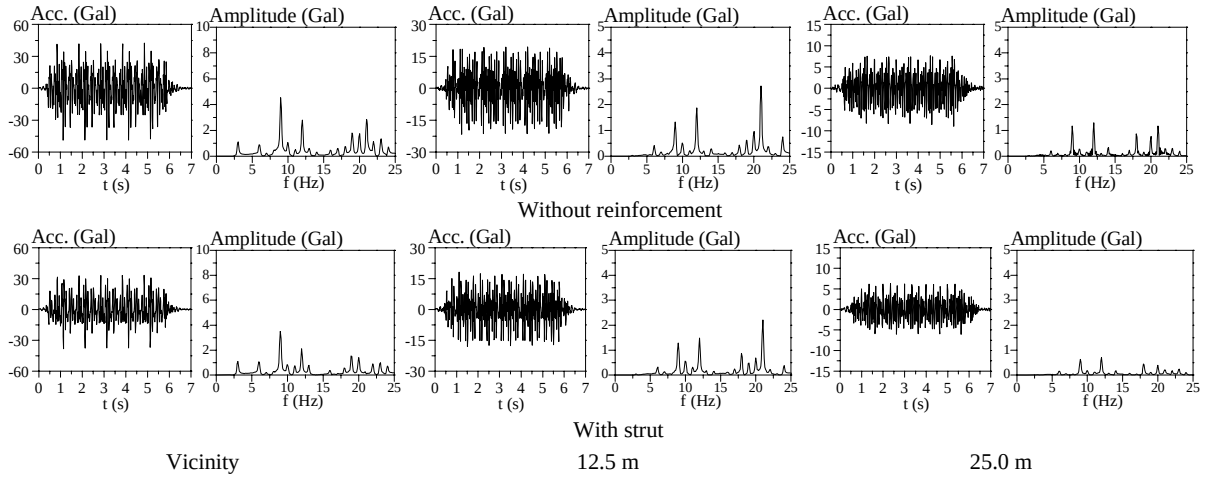

Fig. 7 Site acceleration response (Train speed 270 km/h)

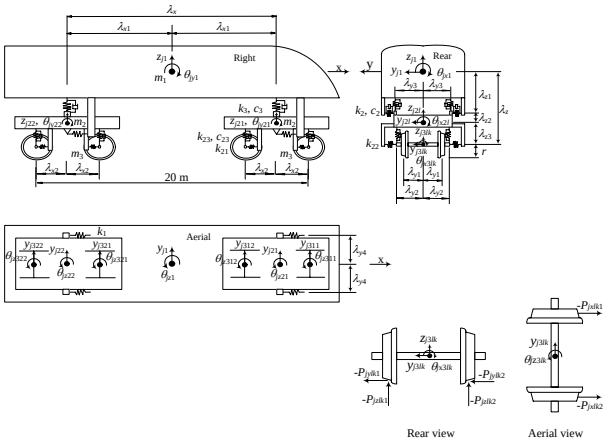

Fig. 8 31-DOF train model

参考文献

1) 江島　淳：地盤振動と対策，pp. 146-154,吉井書店，1979. 6.

2) 吉岡　修：新幹線鉄道振動の発生・伝搬モデルとその防振対策法への応用，鉄道総研報告，特別第30号，1999. 10.

3) 川谷充郎，何　興文，白神　亮，関　雅樹，西山誠治，吉田幸司：高速鉄道高架橋の列車走行時の振動解析，土木学会論文集Ａ，Vol. 62, No. 3, pp. 509-519, 2006. 07.

4) He, X., Kawatani, M. and Nishiyama, S.: Mitigation of Site Vibration around Shinkansen Viaducts Caused by Bullet Train, Proc. of 3rd International Symposium on Environmental Vibrations (ISEV2007), pp. 235-242, Taipei, Taiwan, November 28-30, 2007.

5) 何 興文，川谷 充郎，西山 誠治：橋梁－列車連成を考慮した高速鉄道高架橋・周辺地盤振動解析および振動軽減対策評価，第14 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2007）論文集，pp. 575-578，東京，2007.12.

6) Lysmer, J., Ostadan, F. and Chin, C.C.: “SASSI2000 theoretical manual – A system for analysis of soil-structure interaction”, Academic Version, University of California, Berkeley, 1999.

7) Lysmer, J., Ostadan, F. and Chin, C.C.: “SASSI2000 user’s manual – A system for analysis of soil-structure interaction”, Academic Version, University of California, Berkeley , 1999.