

列車走行時鉄道高架橋周辺地盤振動の解析的な評価手法

An analytical evaluation approach to train-induced ground vibration around railway viaducts

北海道大学大学院工学研究科 ○正員 何興文 (Xingwen He)

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、列車走行により引き起こされる地盤振動問題が注目されている。一部の区間においては、沿線の地盤振動対策を講じるなどの配慮が求められる。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。それらの研究の中で、鉄道高架橋における列車走行時の地盤振動については、車両速度、構造物、基礎ならびに地盤のそれぞれの特性が相互に影響すると報告している。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。

鉄道車両と橋梁との連成振動に関する理論的な研究は1960年代後半から国内外で行われているが、地盤振動の課題に焦点を当てた研究は少なく、特に高速走行列車による鉄道高架橋を対象とした車両と構造物の連成振動を扱った地盤振動に関する既往の研究は見当たらない。

鉄道高架橋における列車走行時の地盤振動についての最近の研究では、原ら³⁾が実測と解析の両方から高架橋とその周辺の地盤振動特性の解明に取り組んでいる。その成果として、特定の振動数成分に振動低減効果のある高架橋振動対策工法を提案している。しかし、解析においては、実測データに合うように定めた等価的な加振力を用いており、車両と高架橋との連成を直接的に考慮していない。そのため、等価加振力を設定するために実測を必要とする点が課題である。高架橋の三次元性による効果や列車と構造物の相互作用などの解明のために、連成解析手法の開発が重要な課題である。

そこで著者は、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を構築し⁴⁾、高架橋周辺地盤振動の解析を行っている^{5), 6)}。本論文では、これまでの研究成果をもとに、列車-橋梁-地盤の動的相互作用を考慮した、鉄道高架橋周辺地盤振動の評価および振動軽減対策効果を検討できる解析ツールの構築・提示を目的とする。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示した上で、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・有効性を示す。

2. 解析手法

2.1 橋梁-列車連成振動解析⁴⁾

鉄道高架橋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い、振動系である車両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、 $\beta=1/4$ とし、各時間間隔における収束判定は1/1000とする。また、通常地盤振動問題では比較的到低い領域の振動数に着目しているが、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、モード解析における考慮する最高振動数を100 Hz とした。

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^{7), 8)}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 高架橋および軌道モデル

対象とする橋梁は、高速鉄道における一般的な形式である鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で、本体は1ブロック(24m)の単位で構造的に独立しており、橋軸方向の両端に片持ち梁に相当する張り出し部を有し、軌道等の上部構造によって隣接するブロックと繋がっている。本研究では、3ブロック計72mの高架橋を Fig. 1 に示すような有限要素でモデル化する。すべての部材を一節点6自由度の三次元はり要素とし、質量は節点集中質量とする。橋脚下端部に、基礎および地盤の影響を考慮するため地盤ばねを設ける。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回転を除いた各方向にばねを設ける。軌道狂いについては高低狂いのみ考慮し、レール踏面凹凸の実測値を用いる。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、1次と2次振動モードに対して減衰定数を0.03とする。

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り出し端部、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。

3.2 走行列車モデル

著者の既往研究⁴⁾において、解析精度および解析の効率化の両面を満たす車両モデルを提案する目的から、異なる車両モデルが振動解析に及ぼす影響について詳細な検討を行っている。本研究では、高架橋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を Table 1 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⁴⁾に参照されたい。

本解析では、実測状況に対応する16両編成新幹線列車をモデル化し、走行速度は実際運行速度の270 km/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。

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。フーチングは本来上部で台形となっているが、解析を簡単化するために、立方体で近似する。杭は長さ18 m(5本、○位置)および7 m(2本、×位置)の2種類で構成されている。

地盤振動解析では、橋梁一列車連成解析で得られた三連高架橋の計24本橋脚下端部の動的地盤反力を上述24セットの基礎構造物に加振力として作用させ、高架橋周辺地盤振動応答を求める。本解析では、実測が行われた、Fig. 1 に示す橋脚R-3からL-3へ結ぶ直線上で、橋軸方向中心線から3.2 m(L-3直下: Vicinityとする)、12.5 m および 25.0 m 離れる箇所の地盤応答を照査する。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。

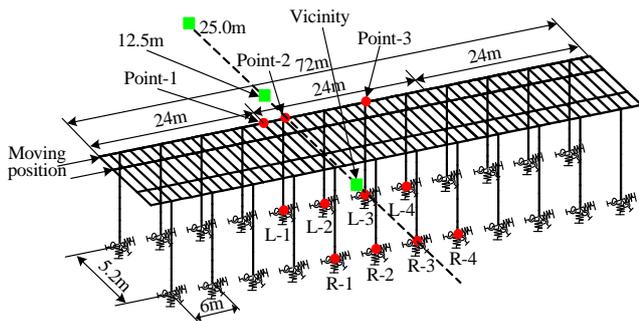


Fig. 1 Finite element model of the bridge

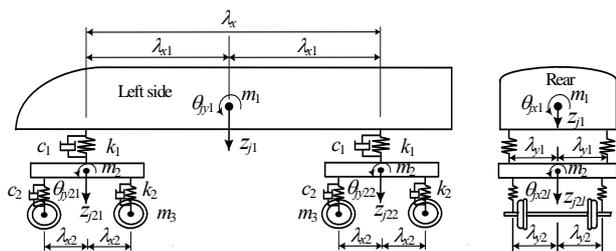


Fig. 2 Nine-DOF car model

3.4 地盤モデル

解析においては、3種類の地層からなる高架橋周辺の地盤を 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⁸⁾。杭下端が到達する深さまで薄層要素を設け、さらにその下部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

著者の先行研究⁴⁾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、橋梁さらに地盤振動低減できると考え、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、張り出し構造部分を隣接する高架橋と完全に剛結合する方法と、Fig. 5 に示すようにストラットで補強する方法との2ケースを考える。ストラットで補強する場合、補強材は橋脚と比べて約2分の1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。

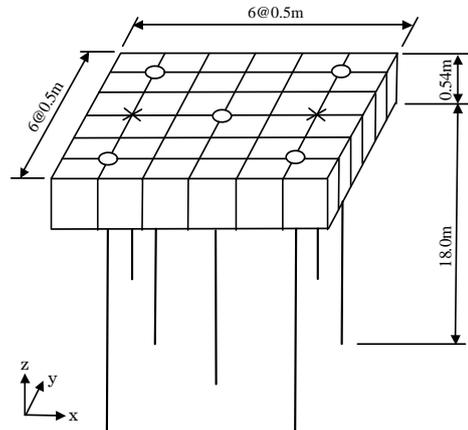


Fig. 3 Substructure model

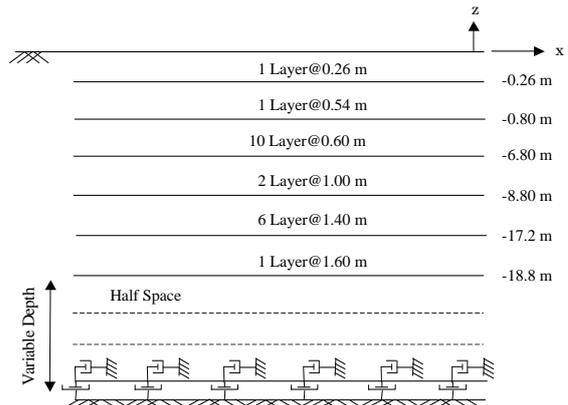


Fig. 4 Site model with layer elements

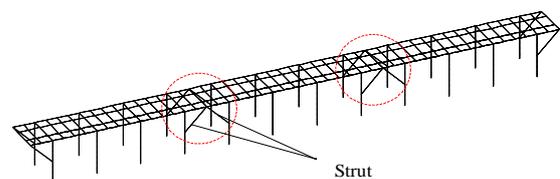


Fig. 5 Depiction of reinforcement with steel struts

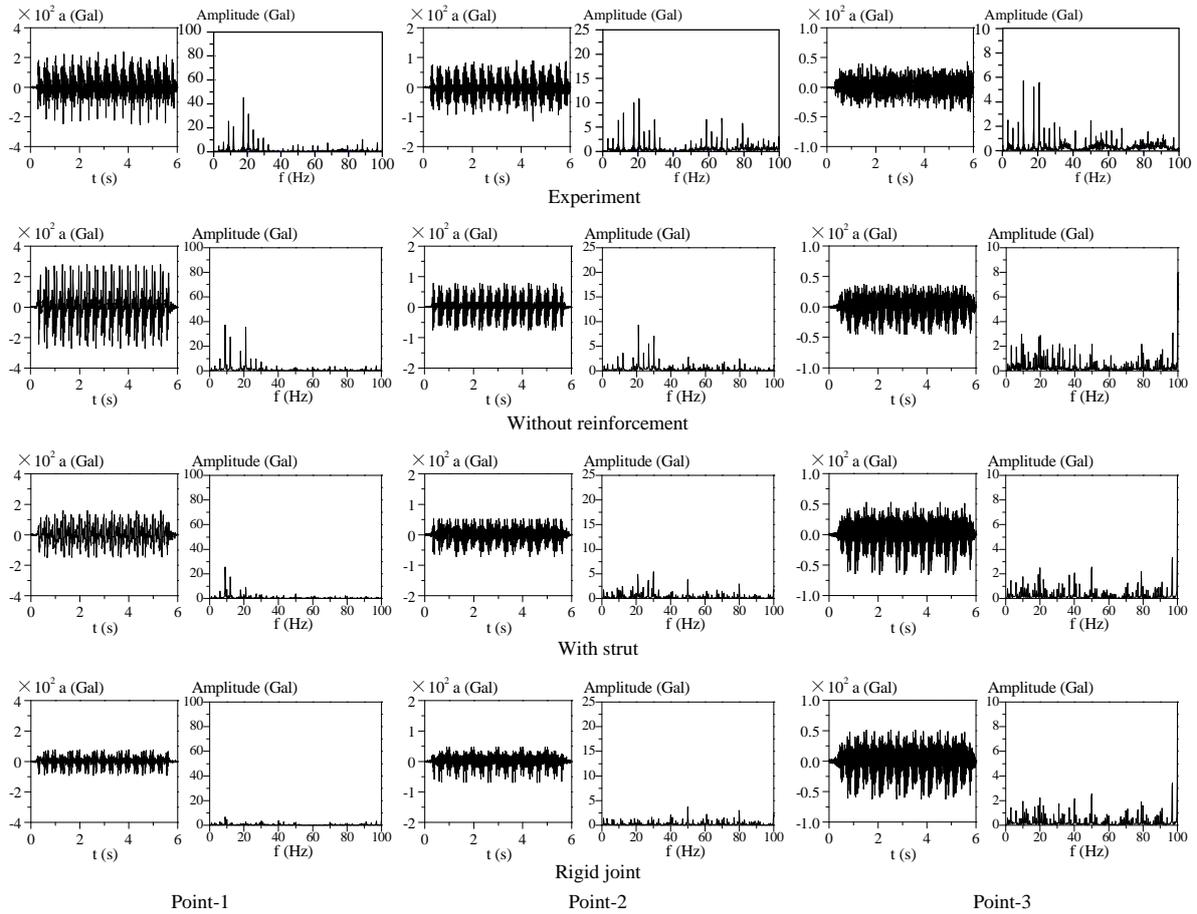


Fig. 6 Bridge acceleration response (Train speed 270 km/h)

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} |

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、著者の既往研究^{4), 5)}において詳細に検討してきた。ここで、高架橋と周辺地盤応答の実測値および解析結果を加速度波形およびフーリエスペクトルについて Fig. 6 と Fig. 7 にそれぞれ示す。両者は概ねよい一致を示しており、本解析の妥当性が確認できる。

4.2 対策による高架橋振動軽減効果

補強前と張り出し部剛結合の場合およびストラットで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。張り出し部剛結合とストラットで補強する場合ともに加速度の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補強を実施することで、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。

4.3 地盤振動軽減効果

補強前と張り出し部を剛結合する場合およびストラットで補強する場合の高架橋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、補強する何れの場合も加速度の振幅は、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。また、剛結合する場合の低減効果が最も大きいことが確認できる。これは、剛結合により、隣接する張り出し部分が構造的に連続になり、高速車両がスムーズに通過でき、張り出し部への衝撃効果を完全に無くすることができるからと考えられる。しかし、剛結合により、高架橋の構造形式が根本的に改変されることになるので、むしろストラット補強の方が現実的である。

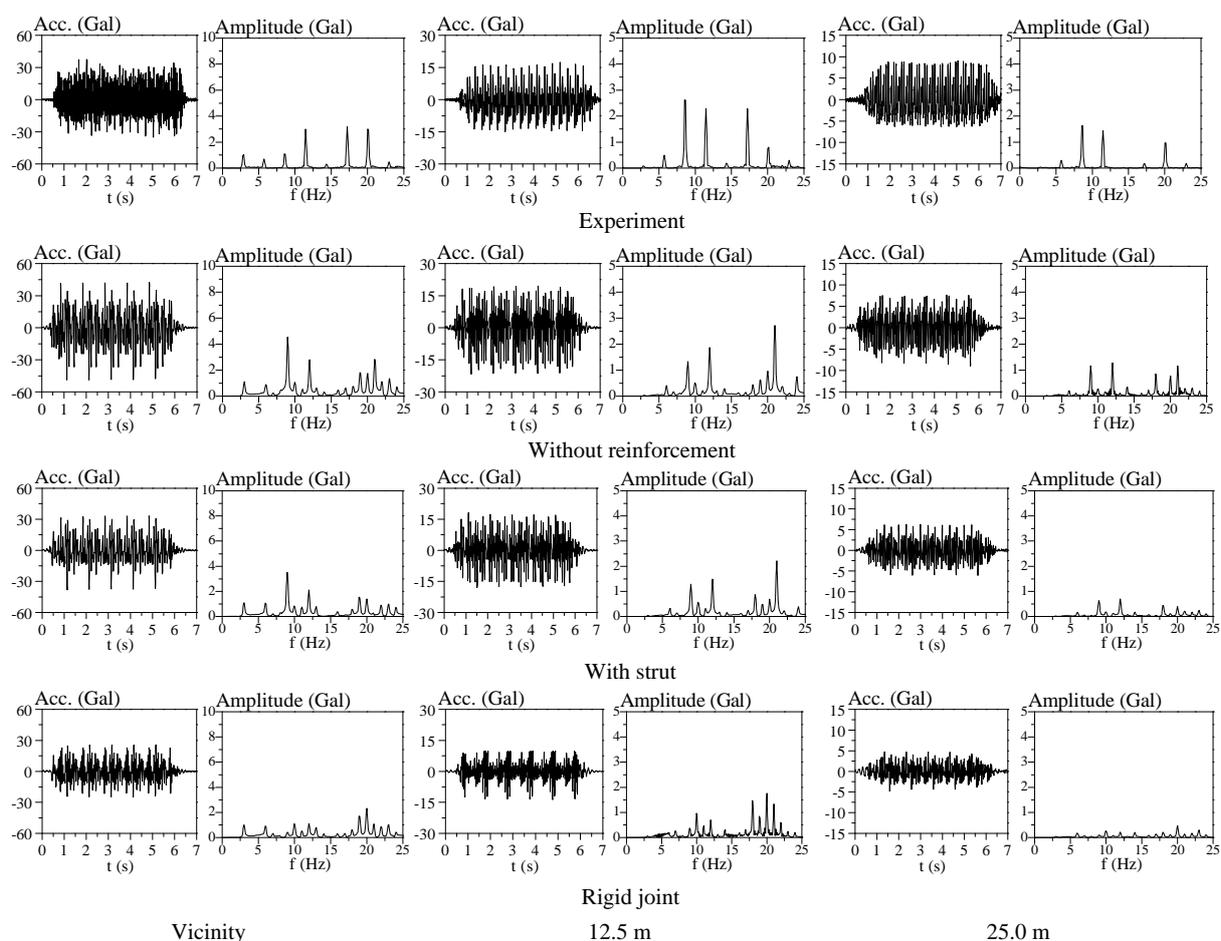


Fig. 7 Site acceleration response (Train speed 270 km/h)

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。原ら³⁾の手法では、車両と橋梁との連成振動を考慮できないため、解析を行う際に走行列車の輪重を実測する必要があり、手軽に実施できないのとは比べ、本手法は、考案する段階で対策の効果を簡単かつ精度良くシミュレーションすることができる。

5. まとめ

本研究では、三次元鉄道高架橋および列車モデルを用い、実高架橋における列車走行時の鉛直方向の振動特性をシミュレーションできる、走行列車と高架橋の連成を考慮した三次元動的応答解析手法を構築した。これに基づき、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、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を評価できる解析ツールを提示した。

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) 原 恒雄，吉岡 修，神田 仁，舟橋秀麿，根岸

裕，藤野陽三，吉田一博：新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発，土木学会論文集，No. 766/I-68，pp. 325-338，2004. 7.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.