

鉄道高架橋周辺地盤振動軽減対策効果を評価する解析ツールの構築

An Analytical Approach to Evaluate Countermeasures against Train-Induced Site Vibration around Shinkansen Viaducts

○何 興文* 林川俊郎** 川谷充郎*** 西山誠治**** 松本高志*****
Xingwen HE Toshiro HAYASHIKAWA Mitsuo KAWATANI Seiji NISHIYAMA Takashi MATSUMOTO

ABSTRACT This research is intended to establish an analytical approach to evaluate the effects of proposed countermeasures against the site vibration around Shinkansen viaducts caused by running bullet trains. In this approach, the entire system is divided into two parts: train-bridge subsystem and foundation-ground subsystem, and their dynamic interactions are taken into account. The validity of the developed approach is demonstrated through comparison with experimental results. Then, site vibration analyses are carried out and countermeasures to reduce the predominant vibration are proposed and evaluated.

KeyWords: 地盤振動解析, 橋梁-列車相互作用, 振動軽減対策, 高速鉄道

Site vibration analysis, Train-bridge interaction, Vibration countermeasures, Shinkansen

1. まえがき

高速鉄道は、1964年開業以来日本の経済活動の大動脈として重要な役割を果たしてきた。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^{1),2)}。

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^{3),4)}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^{5),6),7),8),9)}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¹⁰⁾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。また、吉田・関¹¹⁾は、新幹線高架橋の地盤振動実測結果に基づ

*博(工) 北海道大学大学院工学研究科助教 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
**工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目) 第2種正会員
***工博 神戸大学大学院工学研究科教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) 第2種正会員
****博(工) (株)日建設シビル 技術開発部 (〒101-0061 東京都千代田区三崎町3-3-10)
*****Ph. D. 北海道大学大学院工学研究科准教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目) 第2種正会員

く報告において、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の重要性を示唆している。

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¹¹⁾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¹²⁾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^{13), 14)}。

本研究では、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できる、基本的な鉄道高架橋周辺地盤振動の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え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する。さらに実際に施工された高速鉄道高架橋における振動対策の効果についても再現を試み、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¹²⁾

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に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^{15), 16)}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¹¹⁾された箇所をモデル化する。高架橋本体は1ブロック(24 m)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の高架橋について Fig. 1 に示すような有限要素でモデル化する。限られた長さの橋梁モデルに対し、張り出し端部における高速車両の衝撃の影響を適切に考慮するため、中央ブロックのみを応答評価対象とする。これにより、走行列車の進入および退出における軌道の連続性の影響つまり端部境界条件を正しく考慮することが可能となる。

高架橋モデルについて、できるだけ忠実に実橋梁を再現し解析精度を確保する観点から、また着目振動数領域を勘案し解析効率も考慮して、すべての部材を一節点6自由度の三次元はり要素でモデル化し、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二重節点¹²⁾を定義し、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二重節点を定義し、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する。レール踏面凹凸の実測値を Fig. 2 に示す。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¹⁷⁾、類似鉄道高架橋を対象とした既往の振動試験結果¹⁸⁾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等の詳細は参考文献¹²⁾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。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。

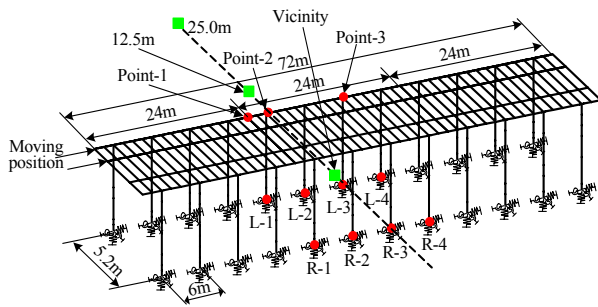


Fig. 1 Finite element model of the bridge

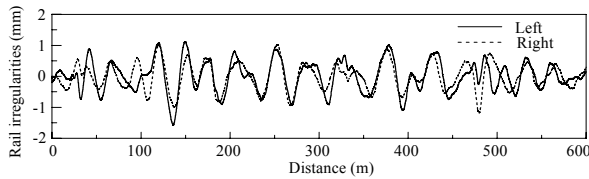


Fig. 2 Measured rail surface roughness

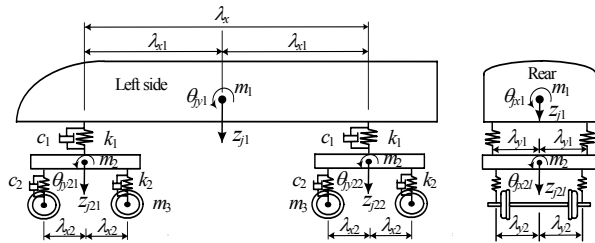


Fig. 3 Nine-DOF car model

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 (N/m) | k_1 (Upper) | 8.86×10^5 |
| | k_2 (Lower) | 2.42×10^6 |
| Damping coefficient c (N·s/m) | c_1 (Upper) | 4.32×10^4 |
| | c_2 (Lower) | 3.92×10^4 |
| Natural frequency (Hz) | f_u (Upper) | 1.07 |
| | f_l (Lower) | 7.41 |

3. 2 走行列車モデル

著者らの既往研究¹²⁾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. 3 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¹²⁾に参照されたい。

本解析では、実測状況に対応する 16 両編成の新幹線列車をモデル化し、走行速度は実際の運行速度 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. 4 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 (Type 1, 5 本, ○位置) および 7 m (Type 2, 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、Table 3 と Table 4 にそれぞれ示す。

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。

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. 5 に示す 21 層からなる薄層要素でモデル化する。

Table 3 Properties of footing

| 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 |

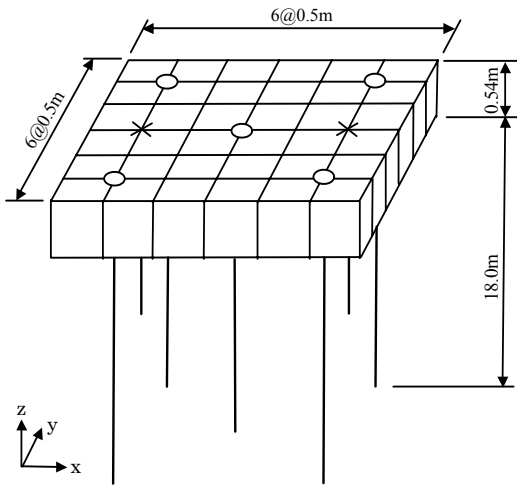


Fig. 4 Substructure model

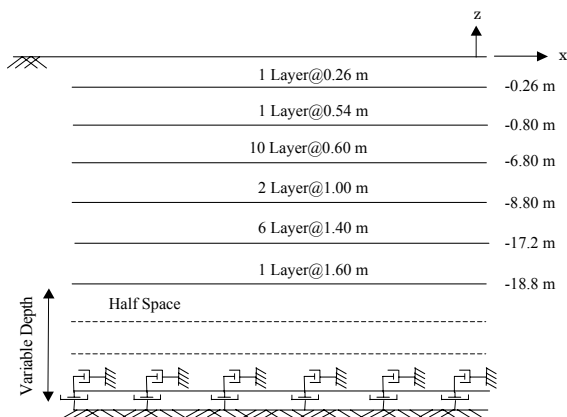


Fig. 5 Site model with layer elements

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 V_s (m/s) | 80 | 190 | 350 |
| Damping constant | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

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¹⁶⁾。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

3. 5. 1 簡易補強工

著者らの先行研究¹²⁾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剛結合する方法と、Fig. 6 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。

3. 5. 2 実橋における補強事例

前項での議論と同様に高架橋の張り出し端部を補強する観点から、原ら¹⁰⁾が実高架橋における対策工を検討・提案し、実際に応用されている。ここで、本連成解析手法の適用例として、原らによる現場施工された地盤振動対策工の低減効果を、

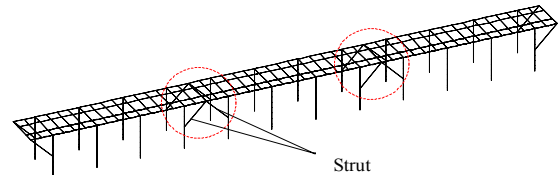


Fig. 6 Depiction of reinforcement with steel struts

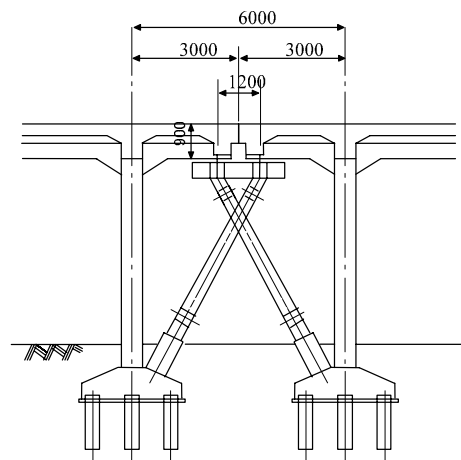


Fig. 7 Outline of X-strut reinforcement¹⁰⁾

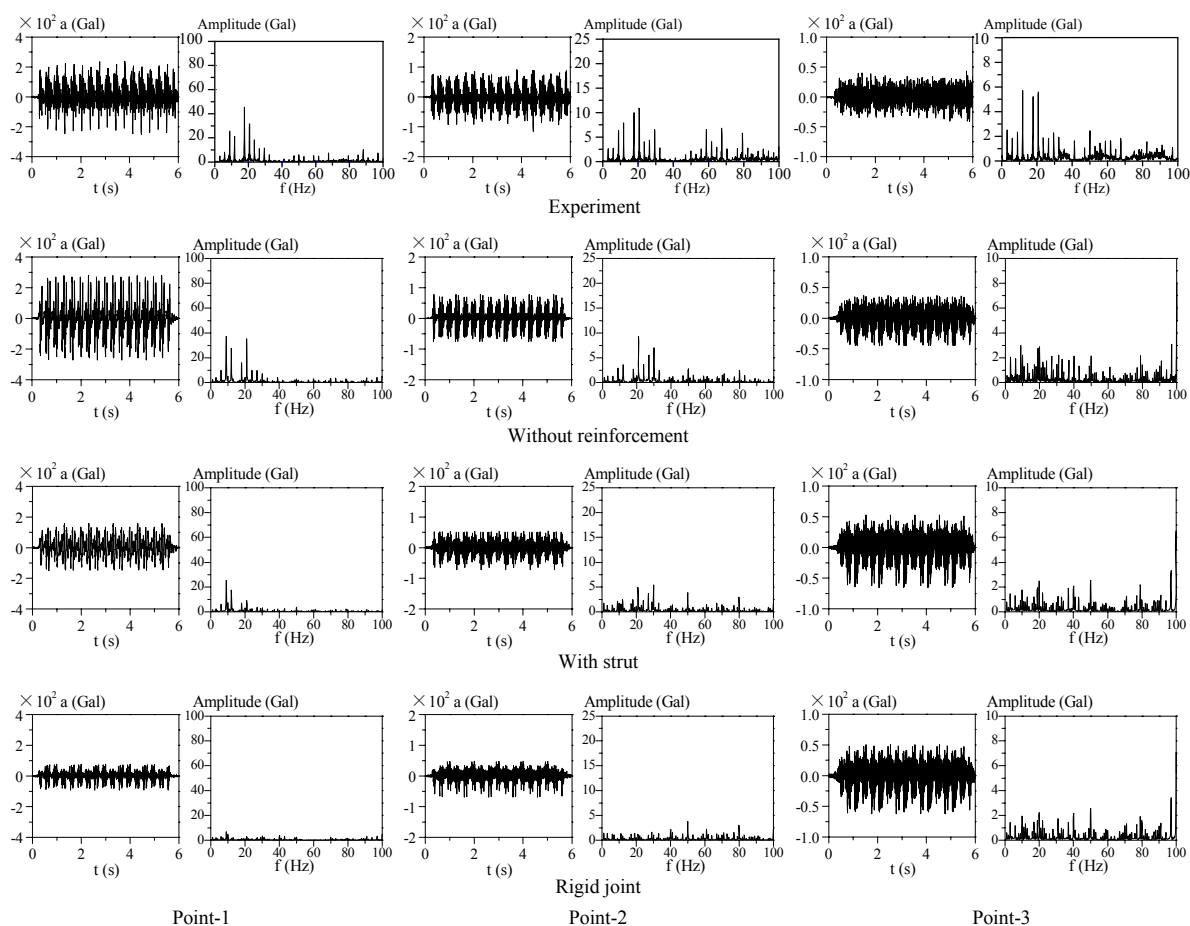


Fig. 8 Bridge acceleration response (Train speed 270 km/h)

Table 6 Max and RMS values of bridge acceleration

| | | Point-1 | Point-2 | Point-3 |
|--------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| Max (Gal) | Experiment | 239.4 | 91.4 | 43.1 |
| | Without reinforcement | 279.4 | 78.3 | 44.9 |
| | With strut | 157.2 | 72.0 | 65.4 |
| | Rigid joint | 93.1 | 65.8 | 72.0 |
| RMS (Gal) | Experiment | 79.8 | 29.0 | 14.9 |
| | Without reinforcement | 106.5 | 26.8 | 14.8 |
| | With strut | 55.4 | 20.1 | 16.6 |
| | Rigid joint | 24.4 | 14.5 | 17.0 |

解析にて確認する。ただし、原らの論文で対象となっている高架橋および新幹線列車は本論文で示したモデルと、基本的に形式・種類は同じであるが、橋梁の高さや周辺地盤条件など異なる点もある。本解析では、できるだけ原らの論文での解析条件を忠実に用いる。車両に関して、前述車両モデルをそのまま用いた。

Fig. 7 に原らの補強工の構造略図を示す。本解析における対策工は、Fig. 7 よりモデル化し、3ブロック高架橋モデルの中央ブロックと隣接ブロック間の張り出し部に設ける。なお、本対策工では高架橋の張り出し部と補強工の接合条件は、水平方向フリーの沓が設けられており、補強工の沓部に二重節点を用いてモデル化している。さらに詳細な解析条件は参考文献^{10), 12)}に参照されたい。

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^{12), 13)}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. 8とFig. 9に、RMS値をTable 6とTable 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。モデル化に起因する比較的顕著となる張り出し部応答の差異に関しては、参考文献¹²⁾で詳細に論じている。

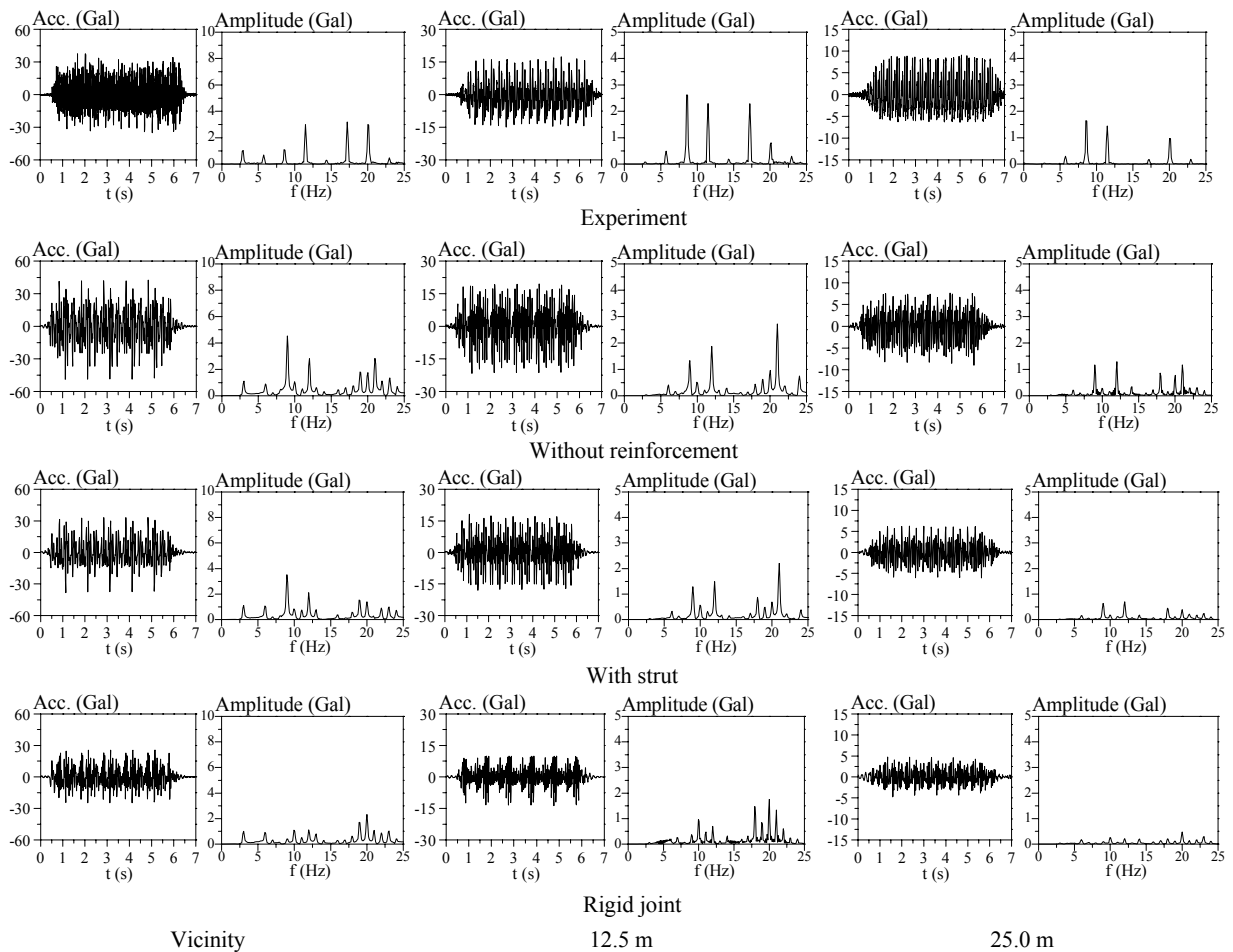


Fig. 9 Site acceleration response (Train speed 270 km/h)

Table 7 Max and RMS values of site acceleration

| | | Point-1 | Point-2 | Point-3 |
|--------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| Max (Gal) | Experiment | 37.7 | 17.3 | 9.1 |
| | Without reinforcement | 48.8 | 21.7 | 9.0 |
| | With strut | 38.2 | 18.1 | 6.25 |
| | Rigid joint | 25.8 | 13.7 | 4.8 |
| RMS (Gal) | Experiment | 11.0 | 6.2 | 3.5 |
| | Without reinforcement | 14.0 | 7.3 | 3.0 |
| | With strut | 10.6 | 6.2 | 2.3 |
| | Rigid joint | 8.5 | 3.9 | 1.6 |

4. 2 簡易対策工による振動軽減効果検証

4. 2. 1 高架橋応答

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鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトルを Fig. 8 に示す。ま

た、それぞれの場合の最大値 (Max) と実効値 (RMS) を Table 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. 2. 2 地盤応答

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. 9 に示す。また、それぞれの場合の最大値 (Max) と実効値 (RMS) を Table 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および RMS 値は、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。

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¹⁰⁾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。

4. 3 実補強工による軽減効果の再現

4. 3. 1 高架橋応答

施工前後で実測された橋脚上 (Point-2 位置) の加速度波形および連成解析の結果を Fig. 10 に示す。実測値と解析値を比較すると、両者ともに補強により 30%~50%程度の明確な振動軽減効果が確認される。なお、補強後の実測値では、マイナス側の応答が小さい。これは対策工と高架橋張り出し部の接点である支承部において、上下方向に密着させ一体的挙動させる目的から、施工時に支承部でジャッキアップさせて固定する構造を採用している¹⁰⁾ことによる。

4. 3. 2 地盤応答

施工前後で実測された橋脚 L-1 近傍位置の地盤加速度波形および連成解析の結果を Fig. 11 に示す。補強前において両者は比較的によい一致をしているが、補強後の結果に相違が見られる。これも実構造とモデル化との違いによる結果であると考えられる。実際の対策工における支承としての杓部構造や、前述のようなジャッキアップ効果などは、比較的に複雑であり、本解析で用いた二重節点では、適切に表現できないことが考えられ、詳細検討が必要である。

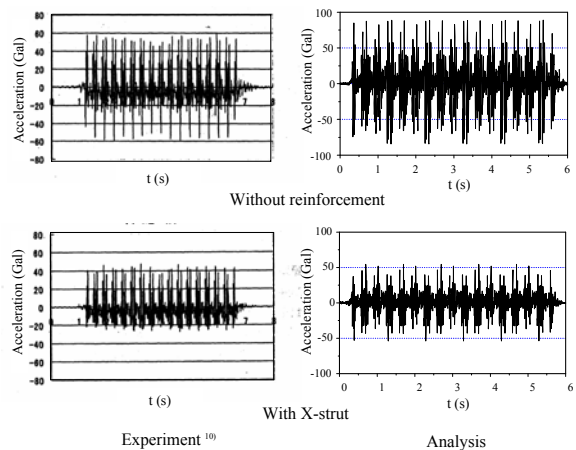


Fig. 10 Bridge responses before and after reinforcement

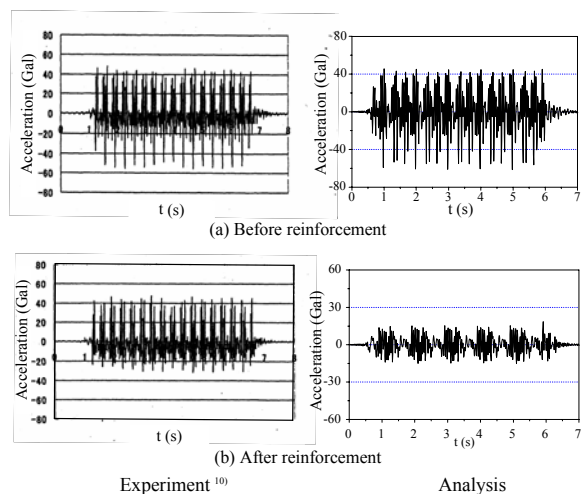


Fig. 11 Site responses before and after reinforcement

解析モデル化にあたっての条件設定において、必ずしも実橋の構造や振動測定時の実測条件などが適切に設定できていないと考えられるが、加速度応答波形に見る振動軽減効果は、実測と解析で類似しており、本解析の有効性が確認された。

5. 結論

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、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える解析ツールを提示した。

列車通過時の橋梁振動および地盤振動の実測値との比較より解析手法の妥当性を確認した上で、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た。さらに、実際に施工された高速鉄道高架橋における振動対策の効果についても再現を試み、本解析ツールの有用・有効性を示した。

【参考文献】

- 1) 原 恒雄：東海道新幹線の高速化技術発展の歴史，運輸と経済，(財)運輸調査局，第63巻，第12号，pp. 32-44，2003. 12.
- 2) Seki, M., Inoue, Y. and Naganuma, Y.: Reduction of subgrade vibration and track maintenance for Tokaido Shinkansen, WCCR' 97, Vol. E, 1997.
- 3) 江島 淳：地盤振動と対策，pp. 146-154, 吉井書店，1979. 6.
- 4) 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.
- 5) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No. 256，pp. 35-47，1976. 12.
- 6) 涌井 一，松本信之，松浦章夫，田辺 誠：鉄道車両と線路構造物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. 4.
- 7) Fryba, L.: Vibration of solids and structures under moving load, Noordhoff International, 1972.
- 8) Diana, G., Cheli, F. and Bruni, S.: Railway Runnability and Train-Track Interaction in Long Span Cable Supported Bridges, *Advances in structural dynamics*, Vol. 1, pp. 43-54. Elsevier Science Ltd., 2000.
- 9) Xia, H., G. Roeck, D., Zhang, H. R. and Zhang, N.: Dynamic Analysis of Train-Bridge system and Its Application in Steel Girder Reinforcement, *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 1851-1860, 2001.
- 10) 原 恒雄，吉岡 修，神田 仁，舟橋秀磨，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.
- 11) 吉田幸司，関 雅樹：RCラーメン高架橋の柱剛性向上による鉄道振動への影響，構造工学論文集，Vol. 50A, pp. 403-412, 2004. 3.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Agabain, M. E.: The Effect of Various Damping Assumptions on the Dynamic Response of Structure, Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Eng., Vol. 8, pp. 217-236, 1971.
- 18) 鬼頭 誠，西村昭彦：高架橋の振動試験，構造物設計資料，No. 35，pp. 33-36，1973. 9.