

重軌条化および車両軽量化による新幹線高架橋橋脚地盤反力評価

Numerical evaluation on reaction forces of Shinkansen viaduct pier due to vibration reduction methods

北海道大学工学部	○学生員	加藤 積希 (Tsumiki Kato)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	何 興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学院	学生員	日 指 陽 (Hikaru Hisashi)
北海道大学大学院工学研究院	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院	正 員	松本高志 (Takashi Matsumoto)

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。

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¹⁾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^{2), 3)}も行っている。

本研究では、これまでの研究成果をもとに、列車一橋梁一地盤の動的相互作用を考慮できる解析ツールを用い、軌道の重軌条化、車両の軽量化といった振動軽減対策の高架橋周辺地盤振動に対する低減効果を検証することを目的としている。本論文では、初期成果として重軌条化および車両の軽量化が地盤振動解析における入力加振力である橋脚下端部地盤反力について、数値シミュレーションした上でその影響評価について報告する。

2. 解析手法

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。

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、列車一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一構造物動的相互作用解析プログラム SASSI2000⁴⁾を用いて地盤振動解析を行う。SASSI2000 では、線形地盤一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。紙面の関係で解析手法の詳細について、参考文献¹⁾⁻³⁾に参照されたい。

3. 解析モデル

3. 1 高架橋モデル

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 3 径間の鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で、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、1 ブロックの高架橋について図-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。図-1 で示す点 A, B, C は、本論文における地盤反力を出力する橋脚下端部を示す。

3. 2 列車モデル

著者らの既往研究¹⁾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図-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表-1 と表-2 に示す。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) は図-1 に示す下り線に相当する位置とする。

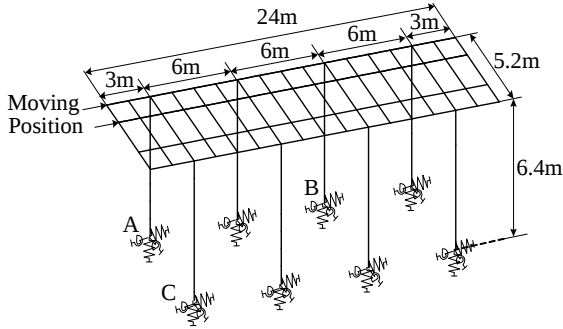


図-1 高架橋有限要素モデル

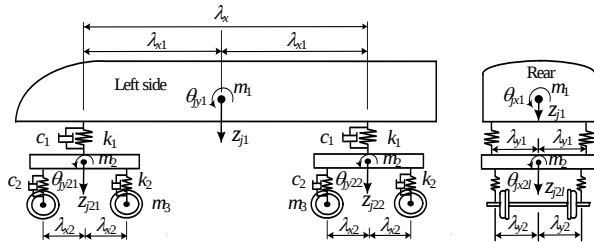


図-2 9DOF 列車モデル

表-1 9 自由度列車モデル各変数

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}

表-2 列車モデル諸元値

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

表-3 重軌条の諸元

	断面積 (cm ²)	断面二次 モーメント (cm ⁴)	単位重量 (kgf/m)
60kg Rail	77.50	3090	60.8
70kg Rail	88.16	4311	69.16
80kg Rail	101.15	6090	79.4

4. 振動低減対策

4. 1 車両軽量化

走行車両の軽量化は、振動軽減対策に留まらず新幹線の高速度の目的でも研究と応用が進められている。本研究では、9 自由度列車モデルの質量を実際の状況を勘案して軽量化の割合を定義する。ここで、新幹線の開業後に実際に運行に使用した車両のなかで、車両全体の重量は最も重いものが 0 系 (967t)、最も軽いものが 500 系 (699t) であることから、ここでは軽量化できる範囲が元の質量の約 75% までであると考え、以下 3 つの解析ケースを設定する。

Case1: 車両の質量が元の値の 100%

Case2: 車両の質量が元の値の 90%

Case3: 車両の質量が元の値の 70%

4. 2 重軌条化

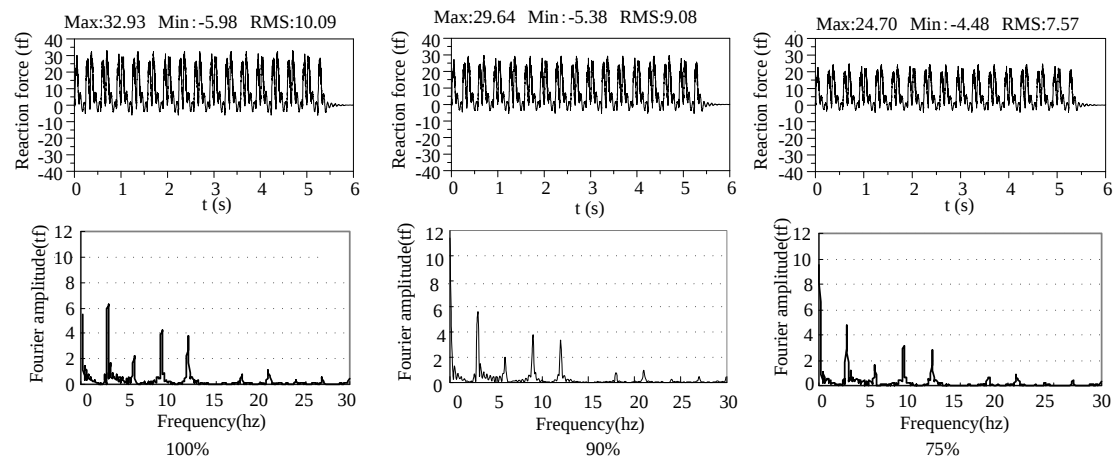
軌道構造の重軌条化は、過去にも在来線鉄道において実測による振動低減対策の効果も報告されている。ここでは、新幹線鉄道における従来の軌道モデル (60kg Rail) および重軌条化を施した 2 つの軌道モデル (70kg Rail および 80kg Rail) の 3 ケースを設定し、その地盤振動に対する低減効果をの比較検討する。表-3 に各軌道モデルの諸元を示す。

5. 解析結果

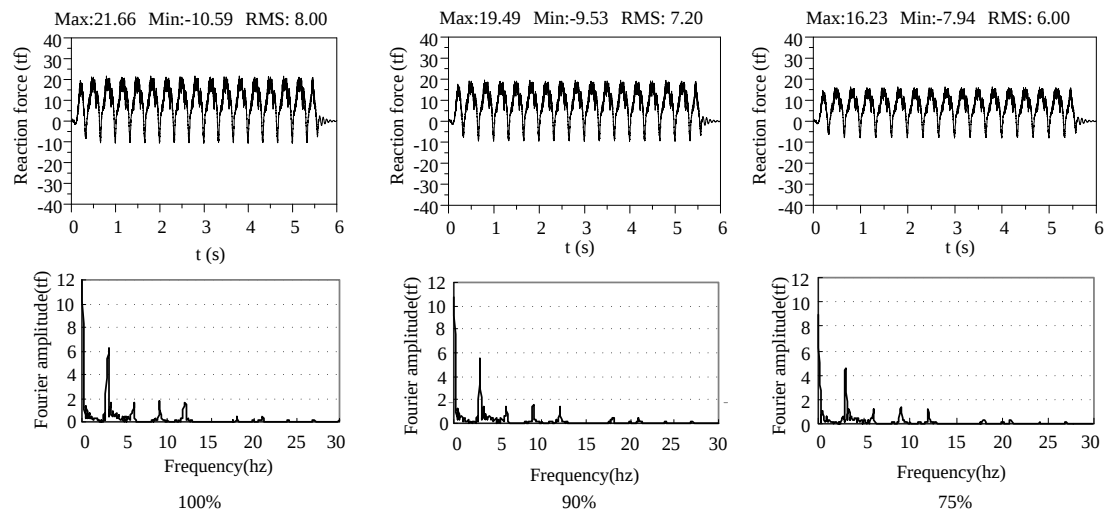
図-1 で示す出力橋脚下端部 A, B, C 各点について車両軽量化と重軌条化のそれぞれの場合の地盤反力応答を最大値、最小値および RMS 値とともに、フーリエスペクトルと合わせて図-3, 図-4 に示す。

橋脚 A, B, C の地盤反力を比較すると、車両軽量化、重軌条化ともに A>B>C の順で最も大きな値をとった。A が B よりも大きな値を示した理由としては、橋脚 A は、橋梁モデルにおける自由端と相当する張り出し端部構造に近い、車両進入時の車輪の衝撃効果や、自由端の過大振動応答よってほかの橋脚より大きな地盤反力が発生したと考えられる。A, B が C よりも大きな値をとった理由としては、C とは異なり A, B が車両の通過するレールの真下の橋脚であるからであると考えられる。

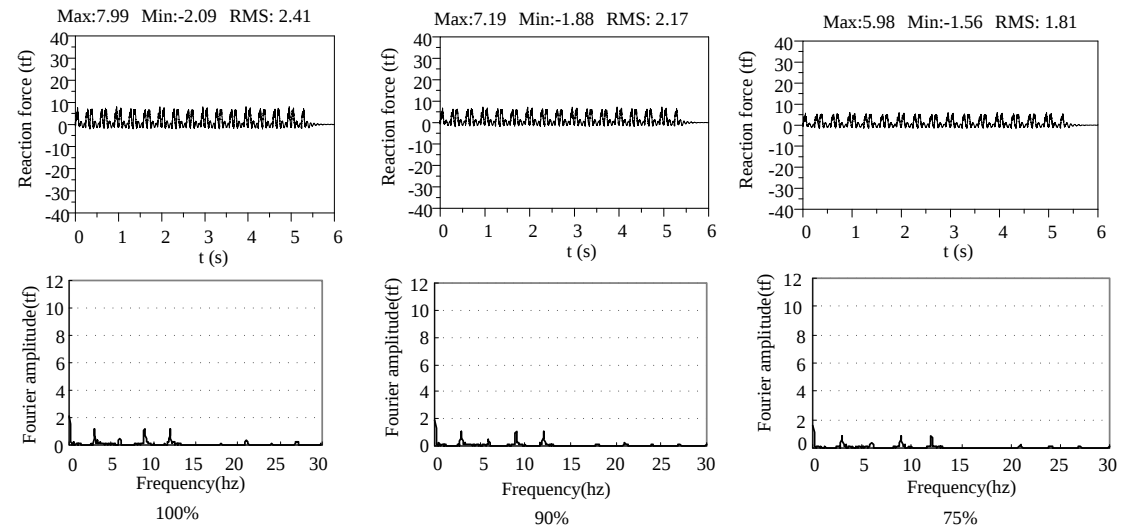
車両軽量化の場合は、車両の重量の低下と比例して地盤反力の応答の振幅と最大値、最小値の絶対値がともに低下していることが分かる。これは、地盤反力応答の強度は、車両の静的と動的荷重成分と橋梁の加速度応答による慣性力に影響を受けるが、車両の重量による影響が割合的に大きいからであると考えられる。



(a) 橋脚Aの地盤反力



(b) 橋脚Bの地盤反力



(c) 橋脚Cの地盤反力

図-3 車両軽量化による橋脚地盤反力応答

その一方で、重軌条化においては、車両軽量化ほどの大きな地盤反力応答の振幅変化は見られなかった。これは、上述反力の強度に影響する諸原因に変化が小さいことが原因であると考えられる。しかし、車両軽量化と重軌条化とともに、地盤反力のフーリエスペクトルにおける振動成分の変化が見られる。周

波数応答成分の変化は、周辺地盤振動応答に十分に影響を及ぼすことが考えられ、その効果の確認が必要である。いずれにしても、車両軽量化と重軌条化対策が地盤振動応答に対し軽減効果をもたらすかどうかについて、本論文の次のステップである地盤振動解析を通して検証する必要がある。

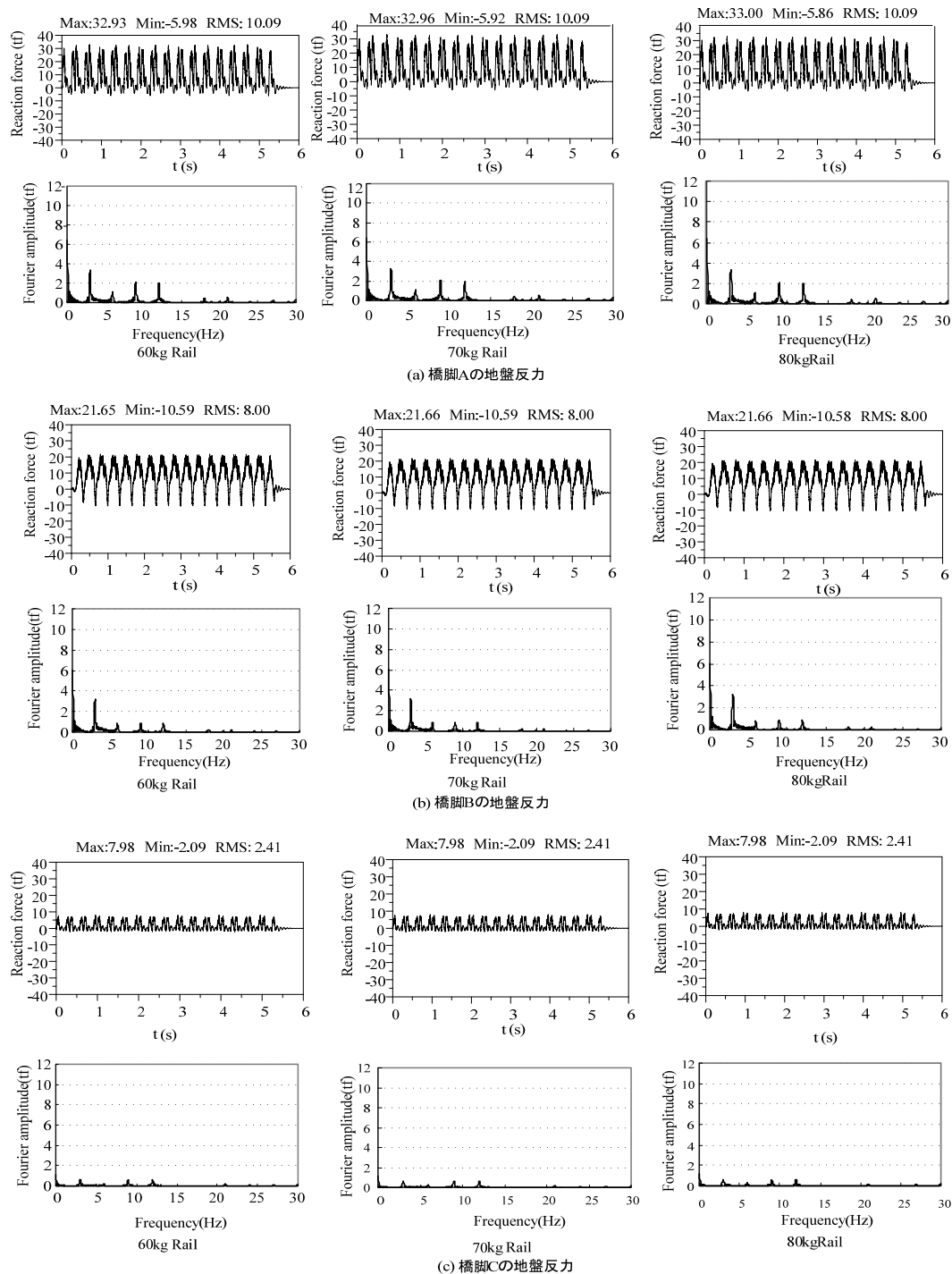


図-4 重軌条化による橋脚地盤反力応答

6. あとがき

本研究では、車両—橋梁の動的相互作用を考慮した橋梁交通振動解析手法を用い、新幹線高架橋橋脚下端部の地盤反力をシミュレーションした。さらに、高架橋および列車に対する振動軽減対策の地盤反力への影響を数値解析結果より考察を行った。その結果、車両軽量化、重軌条化といった振動軽減対策は地盤反力応答に影響を与えることが分かった。今後は、薄層要素法に基づく地盤振動汎用解析プログラム SASSI2000 を用いて地盤振動解析を行い、車両軽量化や重軌条化の対策が地盤振動に及ぼす影響を数値結果で評価していく予定である。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.