

数値解析による新幹線高架橋の地震応答軽減対策評価

Reduction effect evaluation of reinforcement countermeasures on seismic response of Shinkansen viaducts using numerical analyses

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	正 員	何 興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学院	学生員	片瀬慶嗣 (Yoshitsugu Katase)
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

橋梁構造物は我が国の人や物資の陸上輸送において重要な役割を果たしている。一方、1964年に開業した新幹線は、都市間の大動脈輸送を担い続けるとともに、技術進歩によって高速化してきた。地震大国である日本では、橋梁構造物の耐震性及び地震時の走行安全性の確保が重要な課題である。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、道路橋や鉄道高架橋の多くが様々な被害を受け、崩壊したものもあった。さらに、2004年10月23日の新潟県中越地震では、新幹線の開業以降初めて高架橋を走行中の高速列車が脱線する事故が発生した。これを受け、鉄道構造物等設計標準（変位制限篇）が2006年2月に制定された。また、耐震補強が行われたことで、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において甚大な被害を免れた橋梁構造物も多くあった。

しかし、高速列車が高架橋を走行中に地震が発生する場合において、列車の脱線や転覆、高架橋の損傷といった現象は非常に複雑であり、その研究はまだ初期の段階である。また、現段階で実験による解明は困難である。そのため、鉄道高架橋と列車連成系の地震応答をシミュレーションする解析的手法の開発およびその高度化・精緻化が望まれる。高速鉄道橋梁と新幹線列車に関わる研究は、主に鉄道総研¹⁾³⁾を中心に行われているが、著者らもこれまでに線形挙動範囲内での高架橋と走行列車連成系の地震応答解析手法を開発⁴⁾⁵⁾し、その動的応答の検討を行っている。

本論文では、東北地方太平洋沖地震で記録された地震動を用いて、鉄道高架橋と新幹線列車との連成動的解析を行うことにより、列車の動的効果および橋脚の補強効果が橋梁の地震応答に及ぼす影響を検討する。

2. 解析手法

高架橋構造を三次元はり要素で、列車を質点一ばねダンパ振動系でモデル化する。そして、車輪とレールとの変位適合条件により、車両と橋梁との連成振動を定式化する。現段階で構造物の挙動を線形範囲内とし、橋梁の定式化においてモード法を適用する。地震荷重について、橋脚基部における地震加速度による慣性力を橋梁の全節点および列車の全質点に同時に作用するものとする。橋梁-列車連成系の地震応答は、本研究で開発したNewmark's β 逐次積分法に基づく動的応答解析プログラムを用いて求める。このとき $\beta = 1/4$ 、各

時間間隔における収束判定は $1/1000$ とする。本解析手法に関する詳細な定式化過程や、妥当性証明のプロセスについては、紙面の関係で割愛するが、参考文献⁶⁾⁷⁾に参照されたい。

3. 解析モデル

3.1 高架橋モデル

本研究で対象とする橋梁は、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ある。高架橋本体は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ている。地震応答の評価対象は中心部(Central Point)とする。橋梁の基本モデルを図-1に示す。また、地震応答軽減対策として、橋脚をストラットで補強するモデル(以下、補強モデルという)も用いる。この場合、補強材は橋脚の2分の1程度の剛性を持つH型鋼と想定し、補強材と橋脚の接合条件は剛結合とする。各モデルの総節点数および総要素数を表-1に、三次元はり要素でモデル化した補強モデルの横断面図を図-2に示す。

3.2 列車モデル

本研究では、図-3に示すような15自由度の列車モデルを用いる。車体や前後の台車の上下振動(Bouncing)、縦揺れ振動(Pitching)、横揺れ振動(Rolling)、水平振動(Sway)および偏揺れ振動(Yawing)を考慮している。列車と橋梁の動的相互作用については、車輪とレールの相対変位が大きいと想定される場合、車輪とレールの形状を適切に考慮してモデル化する必要がある。しかし、現段階において、構造物の線形挙動を仮定したうえで車輪とレールの相対変位が小さいと想定し、車輪とレールとの接触点を共有させることでその連成を表現するものとする。列車モデルにおける自由度の定義、寸法をそれぞれ表-2、表-3に示す。

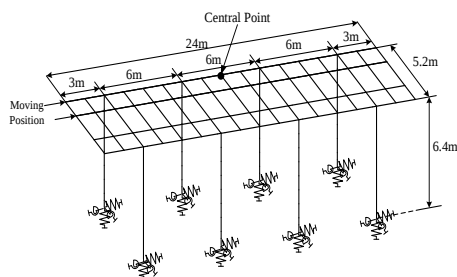
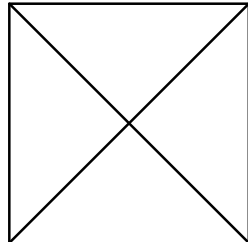


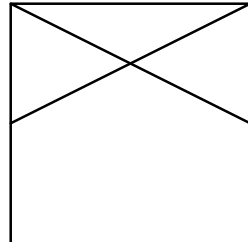
図-1 高架橋基本モデル

表ー1 補強モデルの総節点数および総要素数

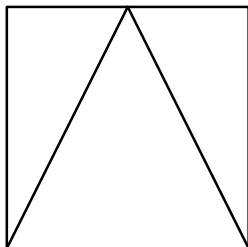
	総節点数	総要素数
基本モデル	434	467
補強モデル①②	438	475
補強モデル③④	438	479



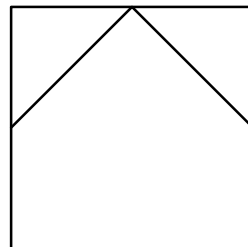
補強モデル①



補強モデル②

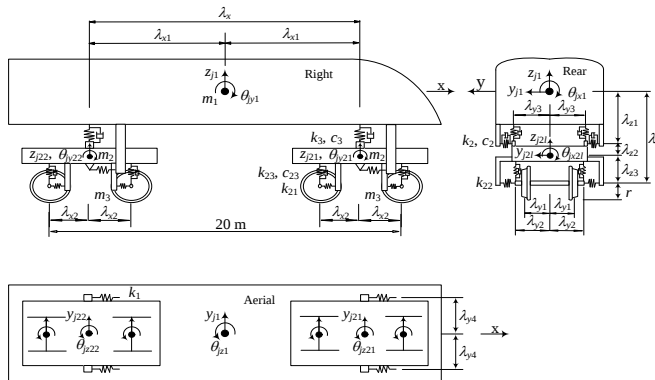


補強モデル③



補強モデル④

図ー2 補強モデル横断面図



図ー3 15自由度列車モデル

4. 解析ケース

本研究では、橋梁地震応答に対し、列車の振動系としての動的効果が橋梁地震応答に及ぼす影響を明らかにするために、以下のような解析ケースを設定する。

Case-1：列車荷重を考慮せず、橋梁のみ。

Case-2：列車荷重を橋梁上に静止する振動系とする。

Case-3：列車荷重を橋梁の付加質量とする。

Case-4：車両を振動系とし、橋梁上に 270km/h で走行させる。この Case-4 の場合、16両編成列車が対象とする橋梁上に非常に短い時間で通過し、列車の動的効果による地震応答評価を十分に行えなくなる。そこで、観測時間中列車が絶えず一定の速度で橋梁上を走行するものと設定する。これにより、列

表ー2 15自由度列車モデル各変数

Lateral translation of car body	y_1
Sway of front bogie	y_{21}
Sway of rear bogie	y_{22}
Bouncing of car body	z_1
Parallel hop of front bogie	z_{21}
Parallel hop of rear bogie	z_{22}
Rolling of car body	θ_{x1}
Axle tramp of front bogie	θ_{x21}
Axle tramp of rear bogie	θ_{x22}
Pitching of car body	θ_{y1}
Windup motion of front bogie	θ_{y21}
Windup motion of rear bogie	θ_{y22}
Yawing of car body	θ_{z1}
Yawing of front bogie	θ_{z21}
Yawing of rear bogie	θ_{z22}

表ー3 15自由度列車モデル諸元値

Notation	Value
m_1	315.76kN
m_2	30.11kN
m_3	8.37kN
I_{x1}	482.96kN・m ²
I_{y1}	24640.46kN・m ²
I_{z1}	24640.46kN・m ²
I_{x2}	28527.5kN・m ²
I_{y2}	40432.8kN・m ²
I_{z2}	40432.8kN・m ²
k_1	5000kN/m
k_2	176.4kN/m
k_3	196.0kN/m
k_{21}	17500kN/m
k_{22}	4704kN/m
k_{23}	1176kN/m
c_2	39.2kN・s/m
c_3	25.6kN・s/m
c_{23}	39.2kN・s/m
λ_c	12.5m
λ_x	17.5m
λ_{x1}	8.75m
λ_{x2}	1.25m
λ_{y1}	0.7m
λ_{y2}	1.0m
λ_{y3}	1.23m
λ_{y4}	1.42m
λ_z	0.97m
λ_{z1}	0.5m
λ_{z2}	0.37m
λ_{z3}	0.1m
r	0.43m

車の動的効果が過剰に評価される可能性があり、耐震設計への影響を考慮するためには、実際の状況を想定した正確な解析モデルを用いる必要がある。しかし、列車通過時に最大の地震動を受ける最も不利な状況を想定すれば、依然有益といえる。

5. 入力地震動

本研究では、K-net により東北地方太平洋沖地震の本震で観測された地震動をダウンロードし、入力データとして用いる。この際、振幅が鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）における Level 1 地震動に近い地震動を選ぶ。図-4 で水平成分、鉛直成分の地震波を、図-5 で水平方向の加速度応答スペクトルを示す。加速度応答スペクトルは 0.480s 付近において最も卓越している。今回用いる地震動は 2011 年 3 月 11 日に神奈川県厚木市で記録されたものである。地震解析では、水平の橋軸直角方向および鉛直方向の両方向に地震荷重を作用させる。水平方向成分については、東西・南北方向の加速度の MAX 値を比較し、大きい方を用いるものとする。なお、解析時間は地震波の持続時間を考慮し 60 秒とする。

また、Case-2 では列車を橋梁の付加質量とみなしているため、同じ橋梁モデルでも Case-1 の場合とは異なる固有値を持つ。それぞれの水平一次固有周期を表-4 に示す。

6. 解析結果

基本モデルおよび補強モデルの場合における橋梁の水平加速度時刻歴応答を図-6 に示す。この結果から得られた知見を以下に述べる。

(1) 列車の有無の違いによる応答評価

Case-1 と Case-3 を比較すると、列車 1 両が橋梁上に静止する場合 (Case-3) において小さな応答となる。これにより、振動系として静止する列車が橋梁における地震応答を抑制する役割を担っていることが確認できた。

また、Case-3 に比べて Case-4 で MAX, RMS 値ともに大きな応答を示していることから、列車の走行が橋梁の地震応答に一定の影響を及ぼしているといえる。

(2) 補強の違いによる応答評価

今回用いた基本モデルの水平一次固有周期と地震波の水平方向加速度応答スペクトルの卓越部分は近い値となった。これを反映し、加速度応答も非常に大きな値となっている。しかし、補強モデルを用いると全てのケースにおいて応答が抑えられる結果となった。これは補強モデルの水平一次固有周期が変化し、地震波の最大卓越部分から離れたことが原因であると考えられる。

Case-1 と Case-2 を比較した場合、Case-2 の方が MAX, RMS 値ともに大きい場合があり、列車荷重を橋梁の付加質量とみなすことが必ずしも安全側に評価しているとは言えない結果となった。これは、各補強モデルの水平一次固有周期である 0.254~0.338s 付近で地震波の水平方向加速度応答スペクトルが非常に細かく変化する形状となっていることが原因であると考えられる。

以上により、地震応答を評価するにあたり応答スペクトル特性が及ぼす影響が大きいことが確認できた。

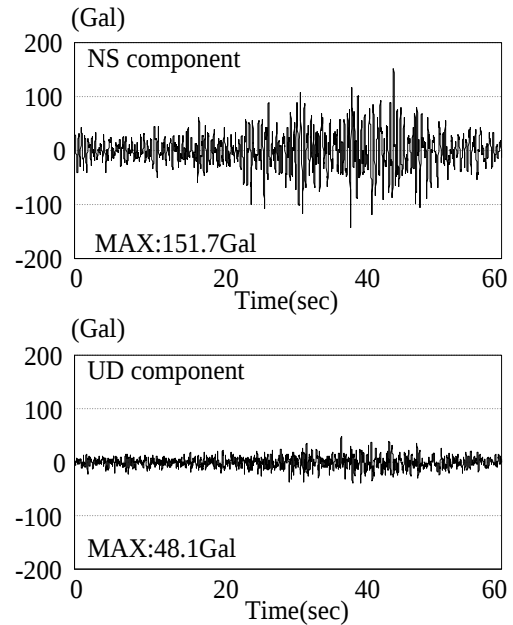


図-4 入力地震動

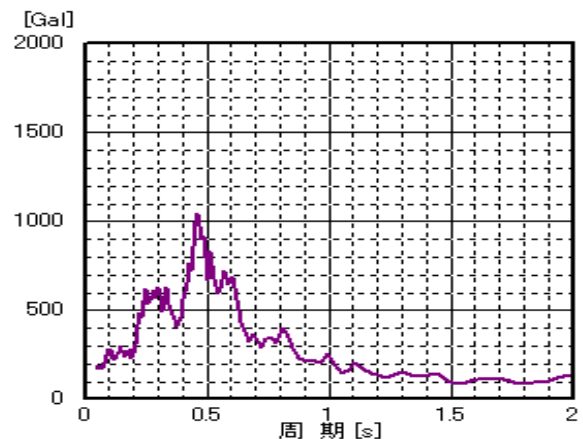
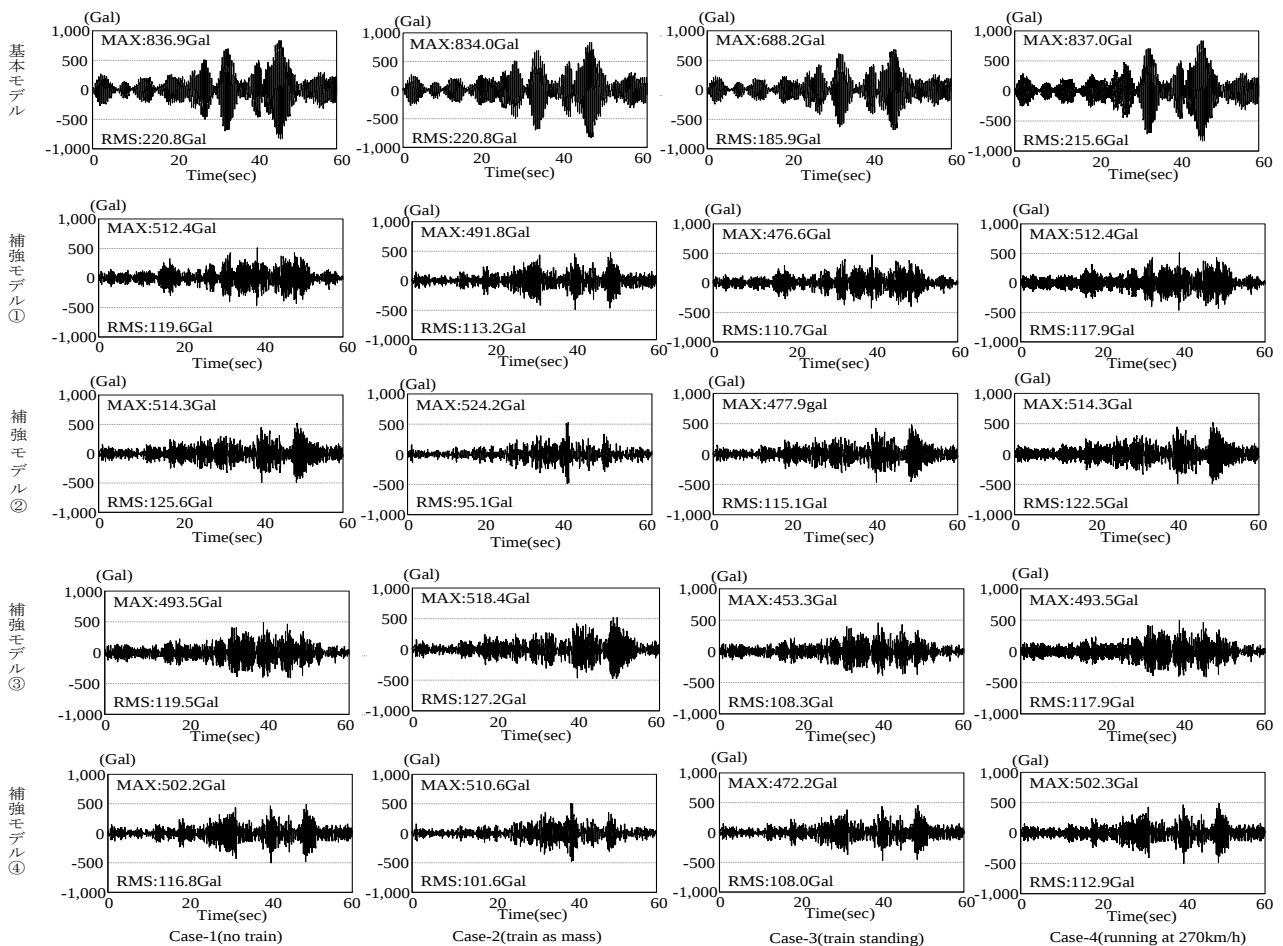


図-5 水平方向加速度応答スペクトル図

表-4 橋梁水平一次固有周期

	Case-1	Case-2
基本モデル	0.474s	0.504s
補強モデル①	0.254s	0.289s
補強モデル②	0.297s	0.338s
補強モデル③	0.267s	0.306s
補強モデル④	0.290s	0.332s



図ー6 水平加速度時刻歴応答

7. あとがき

本論文では、高速鉄道の一般的な形式である鉄筋コンクリートのラーメン橋をモデル化し、実測された地震波を用いて橋梁振動のシミュレーションを行った。そして、列車荷重および橋脚における補強材の有無の違いによる橋梁地震応答を比較した。その結果、静止する列車は橋梁の地震応答の抑制に寄与しているのに対し、列車の走行による振動が橋梁の地震応答に一定の影響を及ぼしていることを確認した。さらに、加速度応答スペクトルにより地震応答が大きく左右されることを確認した。

今後、車輪とレールの摩擦や相対運動を表現できる連成振動解析アルゴリズムの開発や構造物の非線形挙動も考慮したより精緻化したプログラムの構築が将来の課題である。

8. 参考文献

- 1) 涌井一, 松本信之, 松浦彰夫, 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.
- 2) 宮本岳史, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松本信之, 松尾雅樹: 実台車加振実験による大変位車両運動シミュレーションの検証, 鉄道総研報告, Vol. 17, No.9, pp.39-44, 2004.
- 3) 松本信之, 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: 非線形応答を考慮した鉄道車両と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 A, Vol.63, No.3, pp.533-551, 2007.7.
- 4) Xingwen HE, Mitsuo Kawatani, Toshiro Hayashikawa and Takashi Matsumoto: Numerical analysis on seismic response of Shinkansen bridge-train interaction system under moderate earthquakes, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol.10, No.1, pp.85-97, March 2011. (DOI: 10.1007/s11803-011-0049-1.)
- 5) 川谷充郎, 何興文, 山崎基記: 鉄道高架橋地震応答における列車荷重の動的影響評価, 鋼構造年次論文報告集, Vol.17, pp. 451-458, 2009.
- 6) 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.
- 7) He, X., Kawatani, M., Sobukawa, R. and Nishiyama, S.: Dynamic Response Analysis of Shinkansen Train-Bridge Interaction System Subjected to Seismic Load, Proc. of 4th International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance, pp.1-12 (CD-ROM), Kuala Lumpur, Malaysia, October 10-11, 2005.