

新幹線高架橋の地震応答軽減対策検討および列車走行安全性評価

Numerical evaluation on seismic response reduction countermeasures of Shinkansen viaduct and running safety of train

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	正員	何興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究院	正員	松本高志 (Takashi Matsumoto)
神戸大学大学院工学研究科	フェロー	川谷充郎 (Mitsuo Kawatani)

1. まえがき

1964年に開業した新幹線は、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。そして、近年の高まる輸送需要に応えるべく、技術進歩によって高速化してきた。一方、地震大国である日本では、高架橋構造が大きな割合を占める新幹線線路において、橋梁構造物の耐震性や地震時の列車走行安全性がより重要な課題となっている。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、道路橋に加え鉄道高架橋も様々な被害を受けた。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。列車が高架橋を走行中に地震が発生する場合、列車の動的応答や高架橋の損傷といった現象は非常に複雑であり、実験による検討も難しく完全に解明されていないのが現状である。

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数値解析手法の開発およびその高度化・精緻化が望まれている。鉄道橋梁と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⁾している。妥当性が証明された数値解析手法を用いて現存する橋梁の耐震性を確認するだけでなく、考案した耐震補強対策効果の事前検討を行うことも可能となる。

本論文では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による4月11日の余震で記録された比較的弱い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い、耐震補強工が列車の動的作用を考慮した場合の橋梁地震応答に及ぼす影響を検討する。また、列車走行時に地震が発生したときの脱線の危険性についても解析的に検討する。

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車両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 $\beta = 1/4$ とし、各時間間隔における収束判定は $1/1000$ とする。

解析手法の妥当性検討について、列車走行時の新幹線高架橋地震応答の実測値がないため、本研究では以下のように間接的な手順で確認した。まず、列車と橋梁との連成振動解析手法の妥当性確認について、実際に列車走行時に計測された新幹線高架橋の振動応答と解析値と比較して行った。そして、地震応答解析部分の妥当性については、橋梁のみの場合の地震応答解析値を、地震解析汎用ソフトで得られた値と比較して確認した。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。張り出し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、中心部（Central Point）を応答評価対象とする。橋梁の断面図を図-1に、有限要素モデルを図-2（以下、基本モデルと呼ぶ）に示す。

3.2 耐震補強モデル

耐震補強対策として、図-3に示すように橋脚をストラットで補強する耐震補強モデル①を用いる。この場合、補強材は橋脚の2分の1程度の剛性を持つH型钢と想定し、補強材と橋脚の接合条件は剛結合とする。

異なる耐震補強対策として、橋脚へ鋼板巻き立て工法を用いて補強を施した耐震補強モデル②を用いる。国土交通省近畿地方整備局設計便覧⁸⁾を参考とし、補強鋼板の板厚を12mm、補強鋼板と橋脚コンクリートの間隙の充填材は無収縮モルタルとし、その注入厚は30mmとする。

3.3 列車モデル

本研究では図-4に示すような15自由度の車両モデルを用いる。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

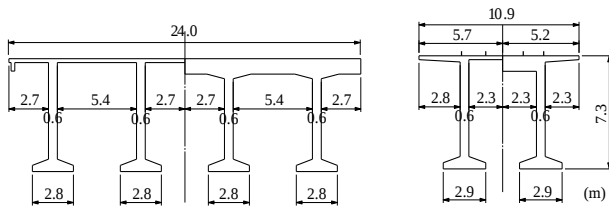


図-1 断面図

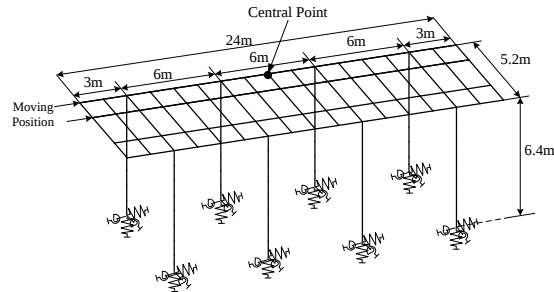


図-2 高架橋基本モデル

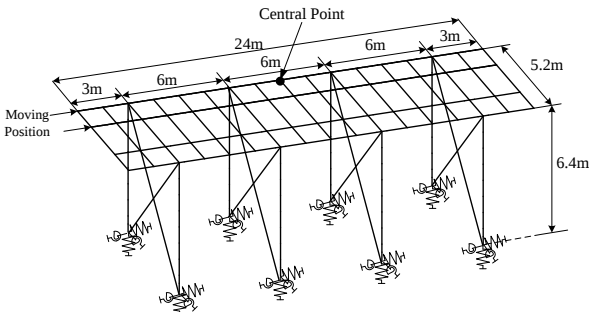


図-3 耐震補強モデル①

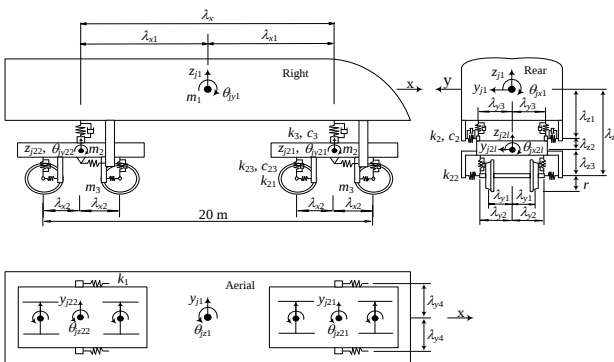


図-4 15自由度列車モデル

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における変位を共有させることでその連成を表現するものとする。車両モデルにおける自由度の定義、動的特性や寸法をそれぞれ表-1、表-2に示す。

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も考慮するために、以下のような解析ケースを設定する。Case-1 (no train) : 列車荷重を考慮せず、橋梁のみでの地震応答解析を行う。Case-2 (train

表-1 15自由度列車モデル各変数

Definition	Notation
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-2 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

as mass) : 列車荷重を停止位置における橋梁の付加質量とする。Case-3 (train standing) : 列車荷重を橋梁上に静止する振動系とする。Case-4 (train running) : 車両を振動系とし、橋梁上を営業速度である270km/hで走行させる。このCase-3の場合、16両編成列車が対象とする橋梁上を非常に短い時間で通過し、列車の動的影響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270km/hで橋梁上

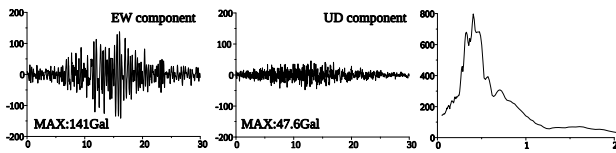


図-5 入力地震動

を走行するものと設定する。これにより、列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

本解析では、東北地方太平洋沖地震の余震で観測された地震動(2011年4月11日に福島県会津若松市での記録)をK-netによりダウンロードし、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(耐震設計編)⁹⁾におけるLevel 1地震動に近い地震動を選ぶ。図-5で各地震波の水平成分、鉛直成分、水平方向の加速度応答スペクトルを示す。また、基本モデルの水平一次固有周期は0.467sである。耐震補強モデルについては、①が0.254s、②が0.354sである。

地震解析においては、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。なお、解析時間は地震波の持続時間を考慮し30秒とする。

6. 脱線係数

本研究における解析では、地震加速度応答のほかに脱線係数を評価することで列車が走行時に地震に遭遇したときの脱線の危険性についても検討を行う。ここで用いる脱線係数は、ナダールの式¹⁰⁾より求められる。ナダールの式とは、摩擦と脱線係数の関係を示したものであり、脱線の危険性を判定するものである。台車の横圧を Q 、輪重を P 、レール・車輪間の接触角を α 、レール・車輪間の摩擦係数を μ とすると、のり上がり脱線の評価する脱線係数は、次式で現される。

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha}$$

本研究では、車輪における横圧と輪重の比を評価する。ここで、一車両が橋梁上を短い時間で通り抜けるため、車輪が橋梁上に乗っている間だけその脱線係数を評価することとする。よって30秒間橋梁上を通過する90両車両の同じ位置の車輪が橋梁上に乗っている間の脱線係数を評価することとなる。また、脱線係数は鉄道の安全管理上大変重要な数値で、長い経験と実験等から最大0.8以下で安全となっている¹⁰⁾。

7. 解析結果

7.1 補強の違いにおける加速度応答評価

橋梁の水平加速度時刻歴応答を図-6に示す。橋梁基本モデルの水平一次固有周期付近に加速度応答スペクトルの卓越成

分を持つ地震波であるため、基本モデルにおける応答は非常に大きい結果となっている。耐震補強モデル①では、いずれのCaseにおいても基本モデルと比較して応答の軽減が確認できる。これは、補強材によって水平方向の剛性の向上だけでなく、水平一次固有周期が変化したことによる影響も関係していると考えられる。

耐震補強モデル②においても、地震応答の軽減が確認できた。特にCase-1, 2においては、耐震補強モデル①と比較して同程度の応答軽減を示している。しかし、車両載荷で橋梁と車両連成系固有振動数の変化や車両の動的影響が及ぼすCase-3, 4では、応答低減効果が低いことも確認できる。

橋梁のみで考えた場合は、ストラット補強と鋼板巻き立て工法による補強の間に地震応答の大きな差異は見られない。しかし、列車が存在する場合においては、ストラット補強は大きな応答軽減効果を示している。安全性の観点からストラットによる補強はより有用性のあるものであるといえる。

7.2 列車の有無における加速度応答評価

基本モデルと、耐震補強モデル①、②のCase-2とCase-3を比較すると、基本モデルと耐震補強モデル①ではCase-3の応答が小さくなり、耐震補強モデル②では応答が大きくなるという異なる傾向を示している。またCase-3とCase-4を比較すると、全てのモデルにおいて応答の増大がみられた。

このことから、橋梁上における列車の振動系としての存在と列車の走行は、橋梁の地震応答に大きな影響を及ぼすことが確認できる。これは、列車走行時の鉄道高架橋の耐震設計において、列車荷重を単なる従属変動荷重として扱うことが、必ずしも完全に適切とは言えず、列車の振動系としての動的効果をさらに適切に評価する必要性を示唆している。

7.3 脱線係数を用いた脱線リスク評価

各車両の一番左前の車輪の脱線係数を図-7に示す。概ね加速度応答と似た傾向を示しており、基本モデル、耐震補強モデル②、耐震補強モデル①の順に値が減少している。このことから、今回用いた耐震補強モデルは、どちらも脱線リスク軽減の効果を示しているといえる。また、本解析での値はいずれも0.2以下であり、危険値である0.8を大きく下回っているため脱線の危険性はないと考えられる。

8. あとがき

本研究では、実際に記録された地震波を用いて列車荷重を考慮したうえで、橋梁構造物における補強方法の違いによる橋梁地震応答評価を行った。その結果、地震波によって考案した補強工法が地震応答の抑制に寄与していることを確認し、ストラットによる補強の有用性を示した。また、列車が振動系として存在することにより、地震応答に影響を与えることも確認し、列車の動的効果を適切に確認する必要性も示した。さらに、脱線係数を評価することにより、橋梁構造への補強効果は脱線リスク低減による列車走行安全性向上につながることも示した。

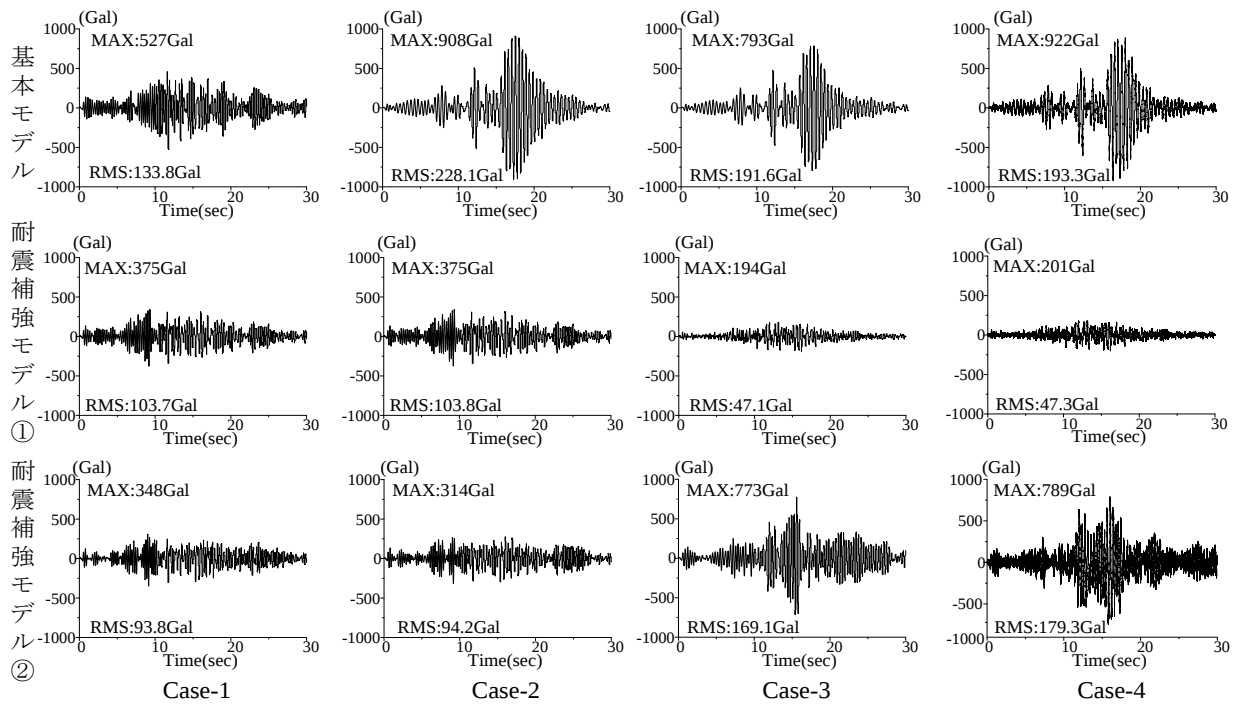


図-6 加速度時刻歴応答

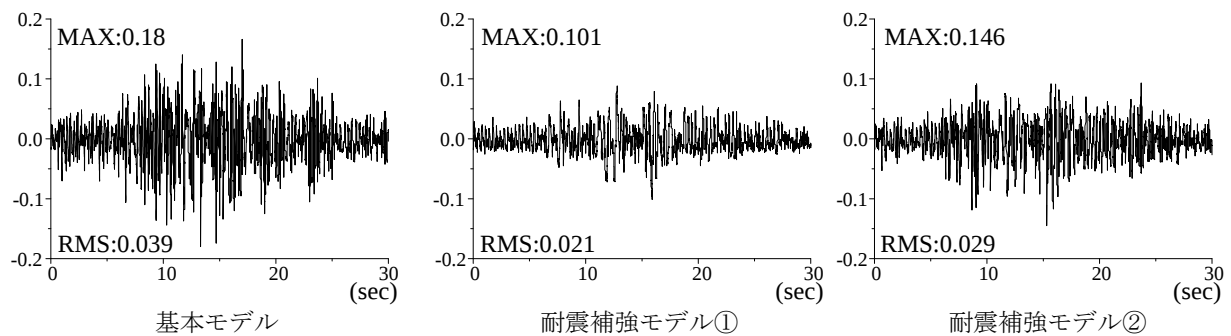


図-7 脱線係数

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.
- 8) 国土交通省近畿地方整備局: 設計便覧, 第3編 道路編, 第16章 耐震補強, <http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/binran/etsuran.html>
- 9) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 1999.1
- 10) 須田 征男, 長門 彰, 徳岡 研三, 三浦 重: 新しい線路・軌道の構造と管理, 日本鉄道施設協会, pp.356-360, 1997.