

列車の動的作用を考慮した鉄道高架橋耐震補強工の効果検討

Reinforcement effect evaluation on seismic response of railway viaducts considering dynamic train load

北海道大学工学部	○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)
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、経済成長に伴い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。それに伴い、地震大国である日本では、鉄道高架橋の耐震性や地震時の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。しかし、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、列車の動的作用を考慮した橋脚への耐震補強工が橋梁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。橋梁の有限要素モデルを図-1（以下、基本モデルと呼ぶ）に示す。また、耐震補強対策として、図-2（以下、補強モデル①と呼ぶ）および図-3（以下、補強モデル②と呼ぶ）に示すように橋脚をストラットで補強するモデルを用いる。この場合、補強材は橋脚の2分の1程度の剛性を持つH型鋼と想定し、補強材と橋脚の接合条件は剛結合とする。

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0.297sである。

3.2 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。車両モデルにおける自由度の定義、寸法をそれぞれ表-1、表-2に示す。

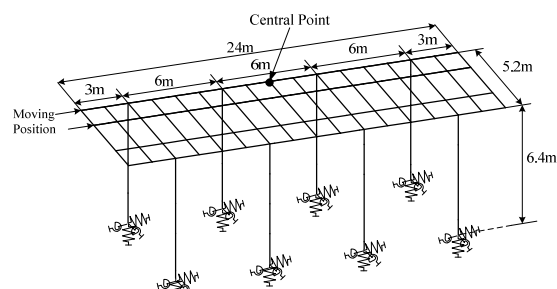


図-1 高架橋基本モデル

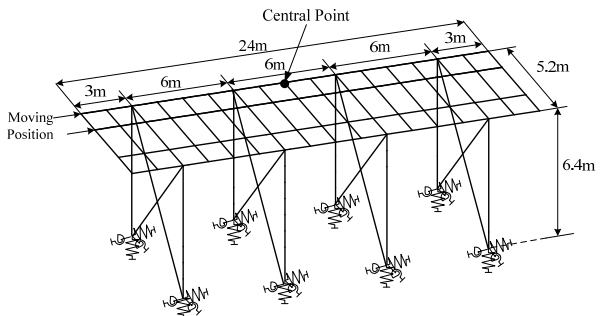


図-2 耐震補強モデル①

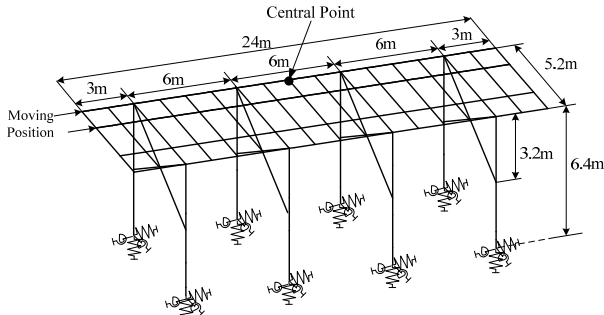


図-3 耐震補強モデル②

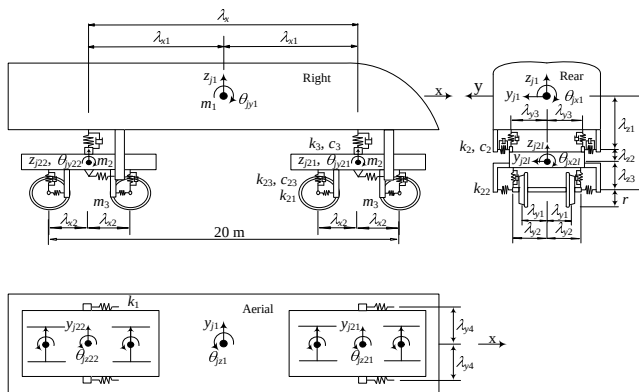


図-4 15自由度列車モデル

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 standing) : 列車荷重を橋梁上に静止する振動系とする。Case-3 (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。

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}	49.248 tf·m ²
I_{y1}	2512.628 tf·m ²
I_{z1}	2512.628 tf·m ²
I_{x2}	2.909 tf·m ²
I_{y2}	4.123 tf·m ²
I_{z2}	4.123 tf·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

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余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、加速度応答スペクトル特性が異なり、振幅が鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）⁸⁾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。図中に記して

ある赤い丸は、橋梁基本モデルの水平一次固有周期を指している。青い丸は耐震補強モデル①、黒い丸は耐震補強モデル②を指している。Ground motion1, Ground motion 2 は2011年4月11日に福島県会津若松市と福島県伊達郡梁川町でそれぞれ記録されたものである。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. 解析結果

Ground motion 1 および Ground motion 2 について、基本モデルおよび耐震補強モデル①と②の場合の橋梁の水平加速度時刻歴応答を図-6, 7 に示す。2つの地震波の水平方向波形のMAX 値にさほど差は見られないものの、基本モデルの場合では3つの解析ケースの何れにおいても、Ground motion 1 による橋梁地震応答が Ground motion 2 に比べてかなり大きい。これは Ground motion 1 の応答スペクトルが橋梁の水平一次固有周期の付近で卓越しており、それを反映しているものと考えられる。また、基本モデルについて、Ground motion 1 におけるCase-2と3の橋梁応答は、Case-1 よりかなり大きくなっているが、Ground motion 2 において逆な傾向を示している。これは、車両の動的効果が橋梁地震応答に及ぼす複雑な現象を示すものである。

Ground motion 1 において補強材を用いると、いずれのケースも基本モデルの場合に比べ橋梁地震応答は小さくなるので、補強効果による影響が大きいと言える。しかし、Ground motion 2 で振動対策低減モデルを用いると、基本モデルの場合より応答がやや大きい。これは、Ground motion2 の応答スペクトルが、振動対策低減モデルの水平一次固有周期で卓越しており、それを反映した結果であると考えられる。この現象は、地震動の周波数成分によって耐震補強工の効果を慎重に確認する必要性を示唆している。

7. 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橋梁構造物における補強材の有無の違いによる橋梁

地震応答評価を行った。その結果、地震波によって補強材が地震応答の抑制に寄与していることが確認できた。また、それ以上に地震波の応答スペクトルが橋梁応答に大きい影響を与えることも確認できた。

本研究での地震解析は、構造物の線形範囲内に留まっているが、大規模地震時における構造物の非線形挙動も考慮したより精緻化した解析モデルや解析手法の構築が将来の課題となる。

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.513/1-31, 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) 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, 1999.10.

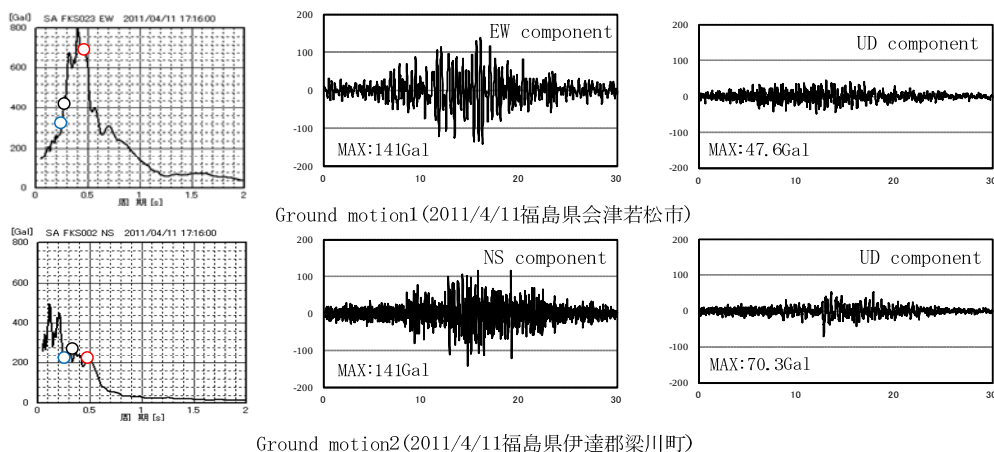


図-5 入力地震動

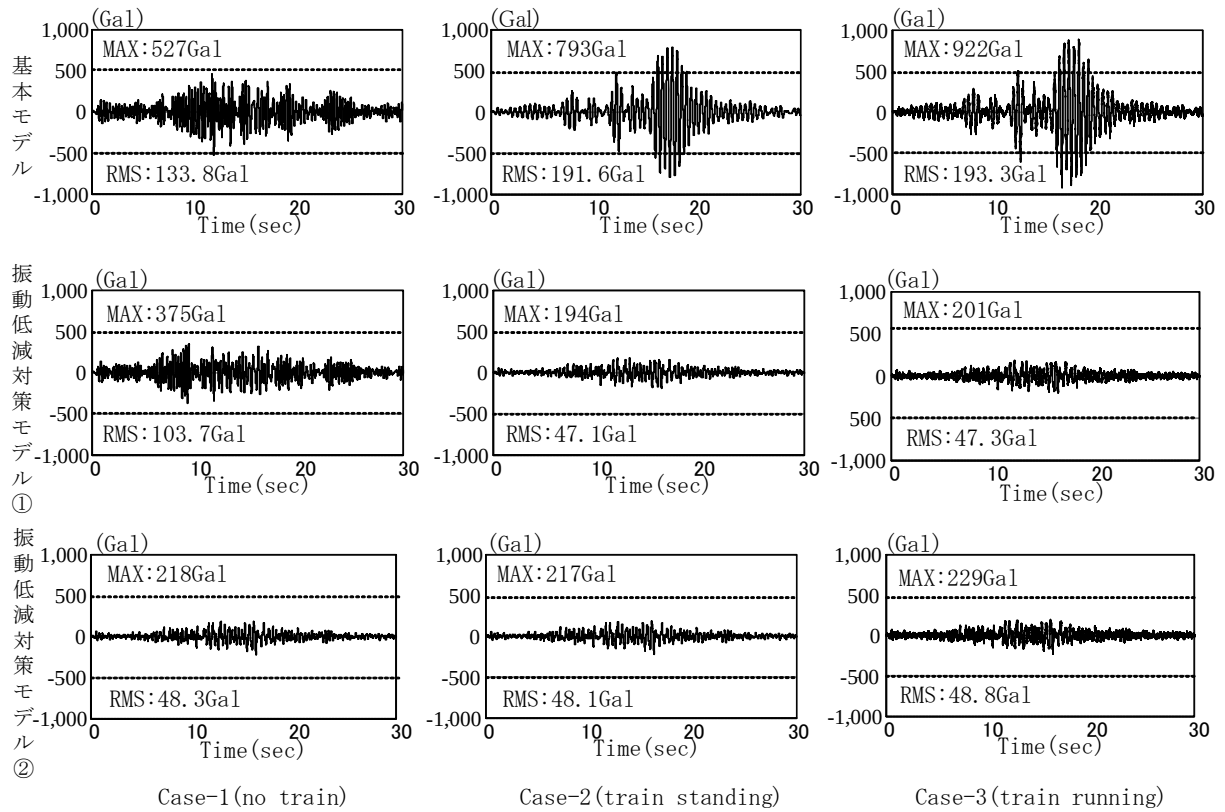


図-6 加速度時刻歴応答(Ground motion1)

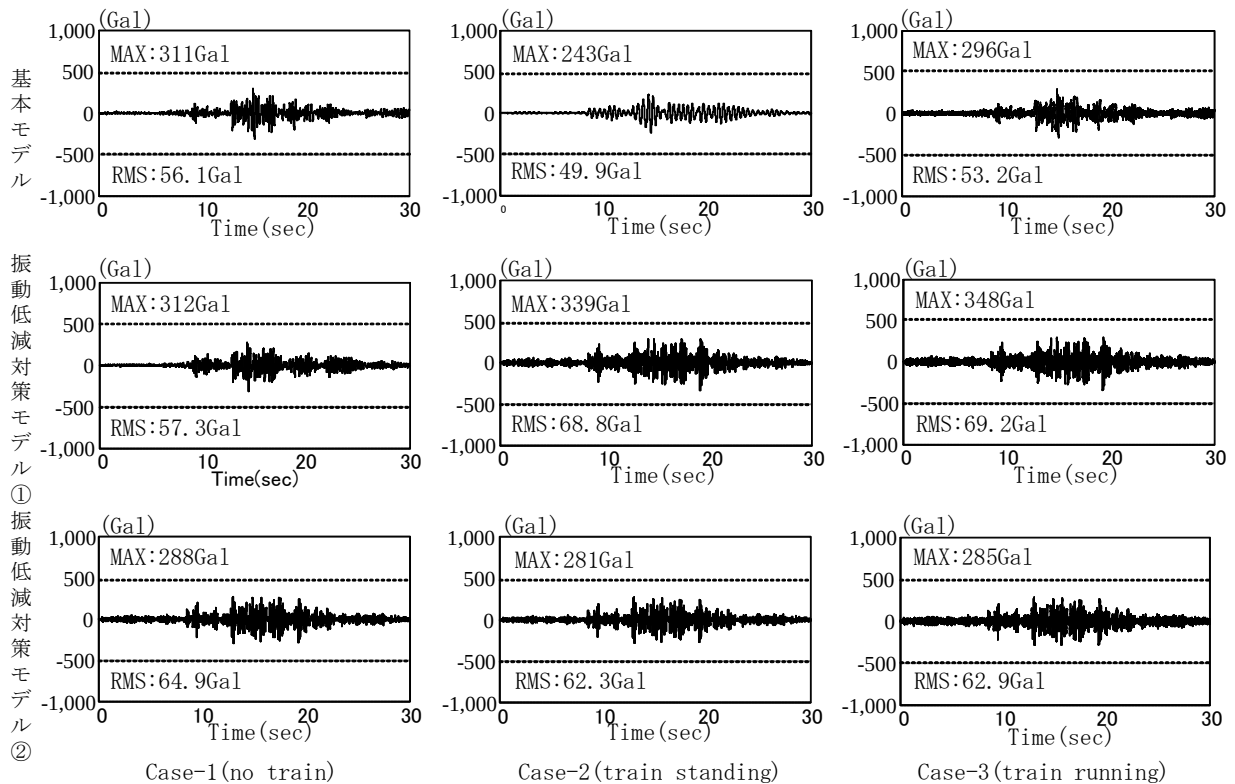


図-7 加速度時刻歴応答(Ground motion2)