

列車の動的効果が鉄道高架橋の地震応答に及ぼす影響

Dynamic effect of train load on the seismic responses of high-speed railway viaducts

北海道大学工学部	○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ている。それに伴い、新幹線が橋梁構造物を高速で通過する際の振動の問題が発生している。さらに、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、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。

とりわけ大地震時における列車走行中の鉄道高架橋構造物の損傷メカニズムおよび車両走行安全性の検討はさらに複雑で、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、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と、それによる4月7日の余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い、列車の動的効果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-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する。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う。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。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に示す。

3.2 列車モデル

本研究では図-2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。

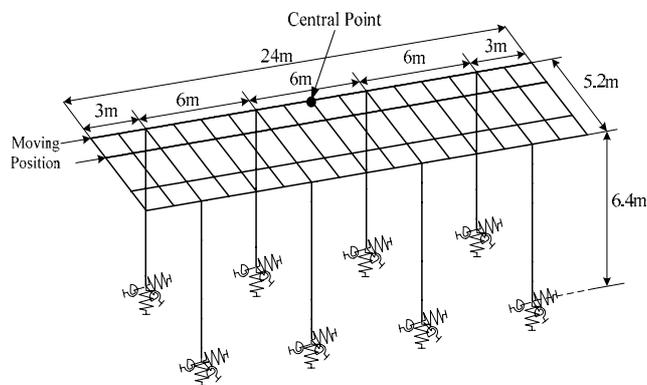


図-1 橋梁モデル

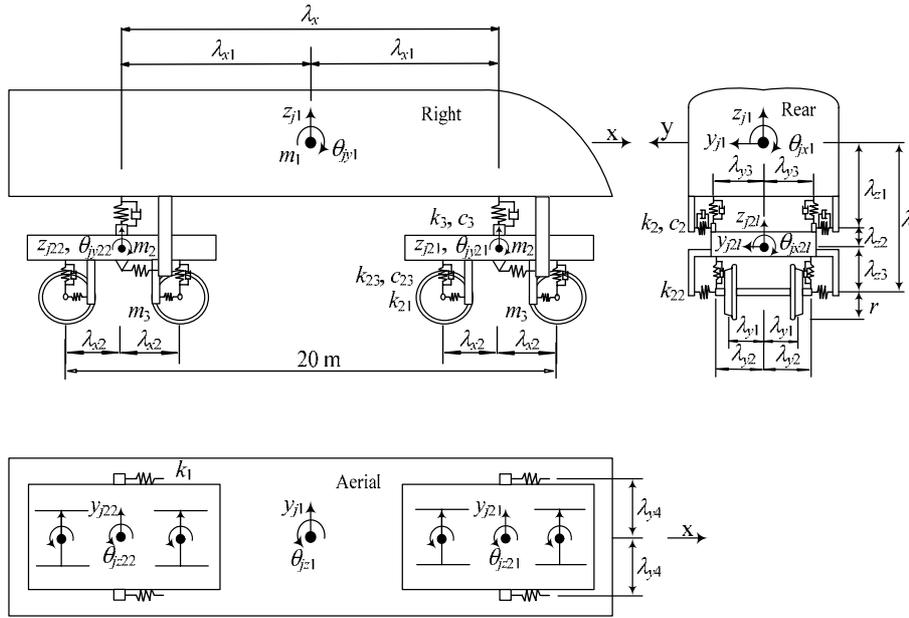


図-2 15DOF 列車モデル

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

3. 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、以下のような様々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。

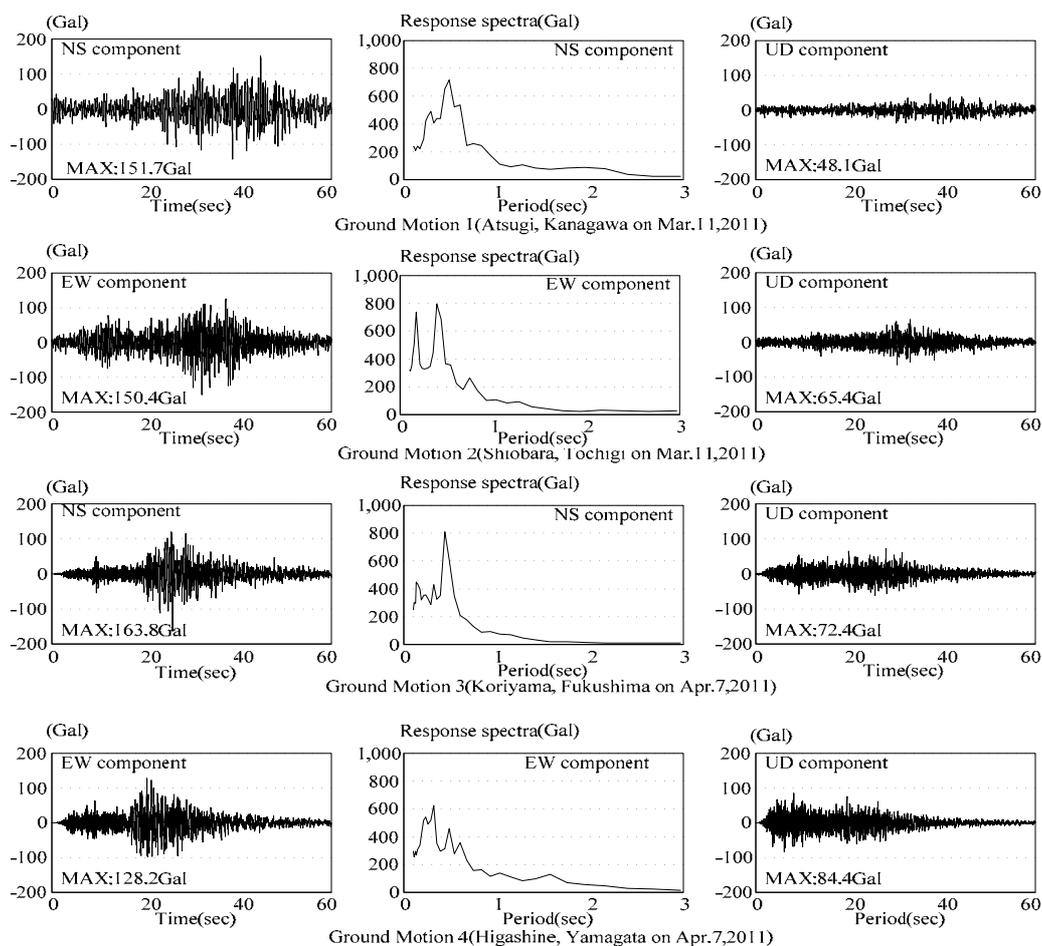


図-3 入力地震動

4. 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・余震で観測された地震動をダウンロードし、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-3 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。ここで、Ground motion 1、Ground motion 2 はそれぞれ2011年3月11日に神奈川県厚木市と栃木県那須塩原市で、Ground motion 3 と Ground motion 4 はそれぞれ2011年4月7日に福島県郡山市と山形県東根市で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60秒とする。

5. 解析結果

上記地震波による橋梁の水平加速度時刻歴応答を図-4 に示す。地震波、解析ケースにより応答の大小は異なるが、Ground motion 1 と 3 において大きな値となっている。これはこれらの地震波の応答スペクトルが橋梁の水平一次固有周期である 0.474 秒付近で卓越しているからと考えられる。逆に、

Ground motion 2 の応答スペクトルについては、0.474 秒付近の値は卓越した部分より急激に下がっており、それを反映して加速度応答は小さな値となっている。入力地震動の水平成分について Ground motion 1 と Ground motion 2 を比較してみると、振幅はほぼ同等といえるが、橋梁の地震応答が大きく異なることから、地震動の強さだけでなく応答スペクトル特性により、地震応答が左右されることがわかる。

また、最大加速度応答に着目すると、橋梁のみの Case-1 と比べ、車両が振動系として橋梁の上に載荷した Case-2 の方が加速度応答がすべての地震波において小さくなっている。これは、車両がダンパーとして働くことが示されている。列車が営業速度で走行する Case-3 の場合、列車走行の衝撃効果により MAX 値は大きくなっているが、RMS 値は橋梁のみの場合に比べ抑制されている。

Case-2 と Case-3 を比較すると、RMS 値がさほど変わらない場合でも MAX 値に大きな差が出ている。どちらも列車を振動系とみなした場合であるが、静止状態よりも走行中の方が加速度応答が大きい。よって地震波の特性によらず、列車の走行は新幹線高架橋の地震応答評価に大きな影響を及ぼしているといえる。

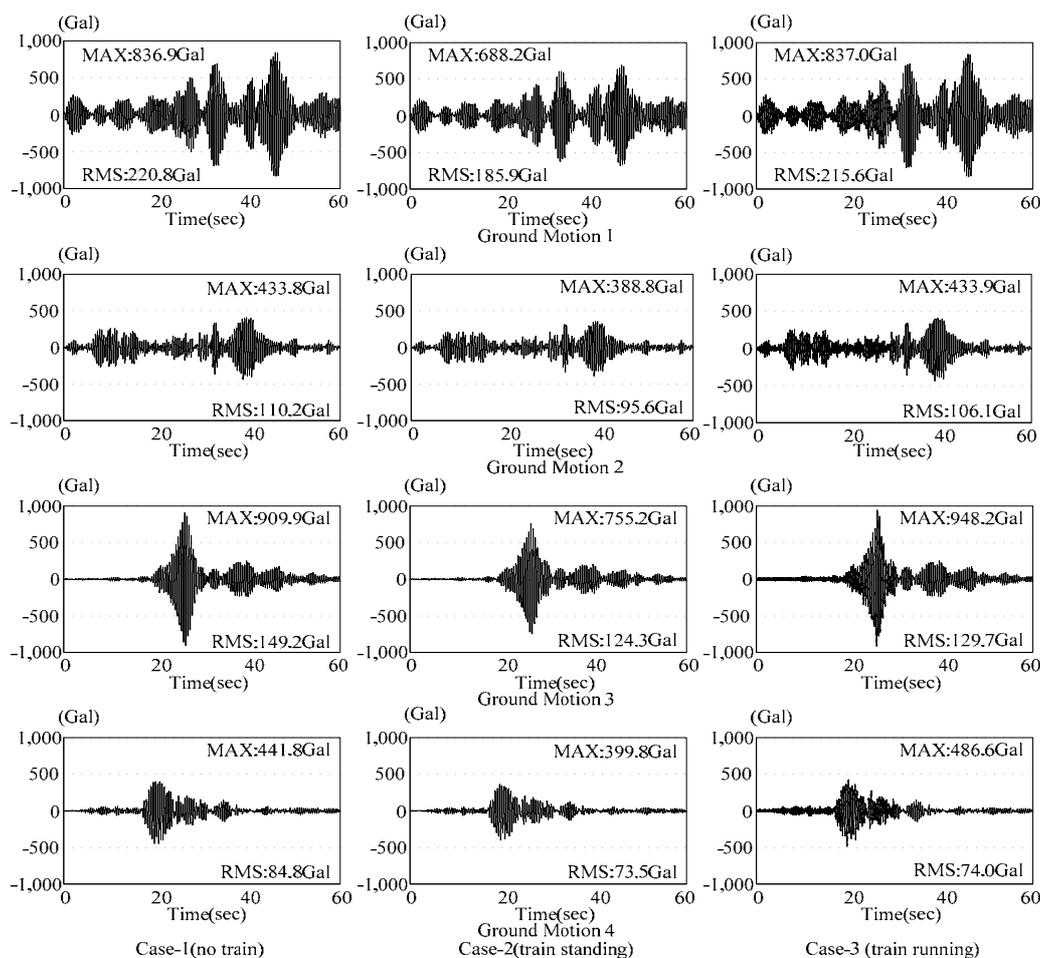


図-4 加速度時刻歴応答

6. あとがき

本研究では、実測地震波を用いて列車荷重の有無の違いによる橋梁地震応答評価を行い、新幹線高架橋の地震応答評価に列車の動的効果が及ぼす影響を検討した。その結果、鉄道橋梁の地震設計において、列車荷重を適切に評価する必要性を示した。

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。

7. 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) 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.