

鉄道高架橋地震応答における列車荷重の動的影響評価

Dynamic effect of train load on seismic response of railway viaducts

○川谷充郎* 何 興文** 山崎基記***
Mitsuo KAWATANI Xingwen HE Motoki YAMAZAKI

ABSTRACT This research is intended to evaluate the dynamic effect of train load on the seismic response of railway viaducts using a developed analytical approach. In this approach, as a preliminary step the dynamic bridge-train interaction is simulated within linear structural behaviors. Based on the seismic analysis results, the effects of the bullet train considered as additional mass as well as dynamic system on the bridge response is examined. The influence of the ground motion frequency characteristics on the bridge response is also investigated. The importance of properly taking into account the dynamic effect of the train on the seismic response of the viaduct can be recognized again through the results of this study.

KeyWords: 地震応答解析, 橋梁-列車相互作用, 鉄道高架橋, 耐震設計
Seismic analysis, Bridge-train interaction, Railway viaducts, Aseismic design

1. まえがき

新幹線を含む鉄道高架橋等の土木構造物は、都市間輸送において大きな役割を果たしており、我が国の陸上輸送に不可欠な存在となっている。その高い重要度から、地震多発のわが国において橋梁構造物および走行列車の耐震安全性の確保も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、道路橋と共に鉄道橋梁も橋脚の倒壊を含む様々な被害を被った。さらに2003年10月23日の新潟県中越地震において、新幹線開業以来初めて高架橋を走行中の高速列車が脱線する事態が発生した。このような被害から、RC橋脚に対して鋼板巻き立て工法などの耐震補強が実施され、既設橋梁の耐震性能の向上が図られていると同時に、地震時の列車走行安全性の向上を図るべく、平成18年2月に橋梁構造物の変位制限を考慮した鉄道構造物等設計標準の変位制限篇も制定された。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にある。

鉄道高架橋における現行耐震設計において、橋梁と列車との相互作用の複雑さから、列車荷重を従たる変動荷重として定義し、実質的に橋梁構造物の付加質量として扱っている¹⁾。しかし、実際に列車は非常に複雑な振動系であり、橋梁地震応答に対する動的影響について、理論および解析手法の進歩によってさらに検討する必要がある。殊に性能照査に基づく設計においては、列車荷重の動的影響をさらに詳細に考慮できれば、より安全かつ経済的な設計に寄与する可能性がある。

道路橋における橋梁-車両連成系地震応答特性について、亀田ら²⁾が実験と解析の両方で解明を試みる先駆的な研究があるが、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、さらに非常に複雑な問題で、現段階で実験による現象解明はまだ困難である。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が望まれる。この種の研究は、国内において主に鉄道総研を中心に行われている³⁾⁵⁾が、著者らも上述目標の実現に向け、橋梁と走行列車連成系の動的解析手法の開発⁶⁾に取り組んできている。

*工博 神戸大学大学院工学研究科教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1) 第2種正会員
**博(工) 北海道大学大学院工学研究科助教 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
***工学学士 神戸大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

これまでの初期成果として、まず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構築し、その動的応答を検討し始めている⁷⁾⁹⁾。

本論文では、構築した手法を駆使し、列車荷重の有無や車両を付加質量と振動系として扱う場合に対し、正弦波および設計・観測地震波を用い、列車荷重の動的効果や地震動の周波数特性が高架橋の地震応答に及ぼす影響等を確認した。その結果、橋梁と列車連成系の地震応答は橋梁および列車の振動特性、さらに地震動の特性に応じて非常に複雑になることを示し、耐震設計において活荷重の動的効果を十分に検討する必要性を示唆した。

2. 橋梁—列車連成系地震応答解析手法

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 高架橋および軌道モデル

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柱式3径間の鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で、列車走行時の高架橋振動応答が実測^{6),10)}された箇所をモデル化する。高架

橋本体は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。橋梁1ブロックに関する断面図をFig. 1示す。本研究では、3ブロック計72mの高架橋についてFig. 2に示すような三次元はり要素でモデル化する。張り出し端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、中央ブロックのみを応答評価対象とする。これにより、走行列車の進入および退出における軌道の連続性の影響つまり端部境界条件を正しく考慮することが可能となる。

高架橋モデルについて、できるだけ忠実に実橋梁を再現し解析精度を確保する観点から、また着目振動数領域を勘案し解析効率も考慮して、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し、橋梁部分の鉄筋コンクリートおよびバラストの質量さらに軌道部分の質量を考慮する。橋脚下端部に、基礎

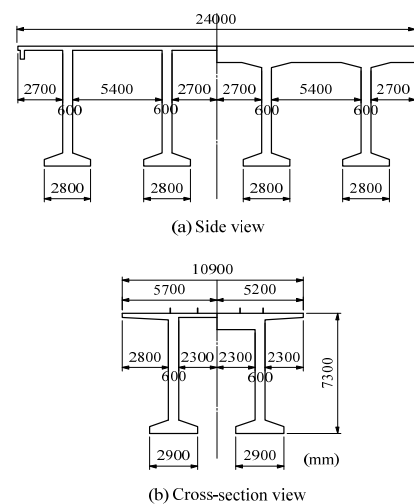


Fig. 1 Bridge dimensions

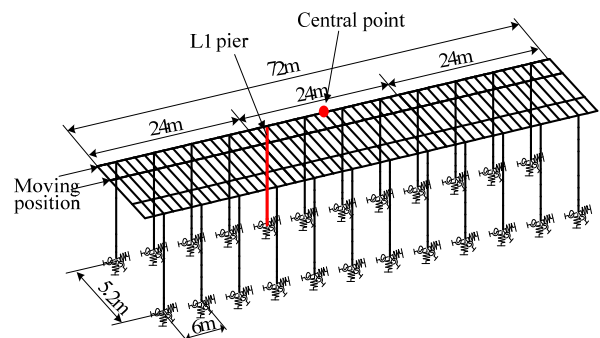


Fig. 2 Finite element model of the bridge

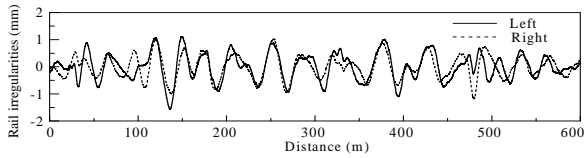


Fig. 3 Measured rail surface roughness

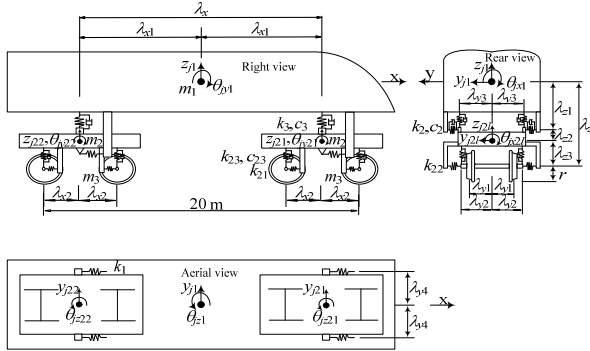


Fig. 4 15-DOF bullet train car model

および地盤の影響を考慮するため二重節点を定義し、実測による周辺地盤条件⁶⁾に基づいて決められる地盤ばねを設ける。対象橋梁周辺の地盤条件は、耐震設計¹⁾に定義されるG4地盤に相当する。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回転を除いた各方向にばねを設ける。軌道狂いについては高低および水平両方向を考慮する。レール踏面凹凸の実測値をFig. 3に示す。高架橋モデルの減衰については、レイリー減衰を用いて評価し、地震時における橋梁の減衰定数は1次、2次振動に対して0.05とする。

Fig. 2において、Central pointは中央ブロックにおける中央点であり、この点について橋梁の地震加速度応答を照査する。また、橋脚断面力の照査は、

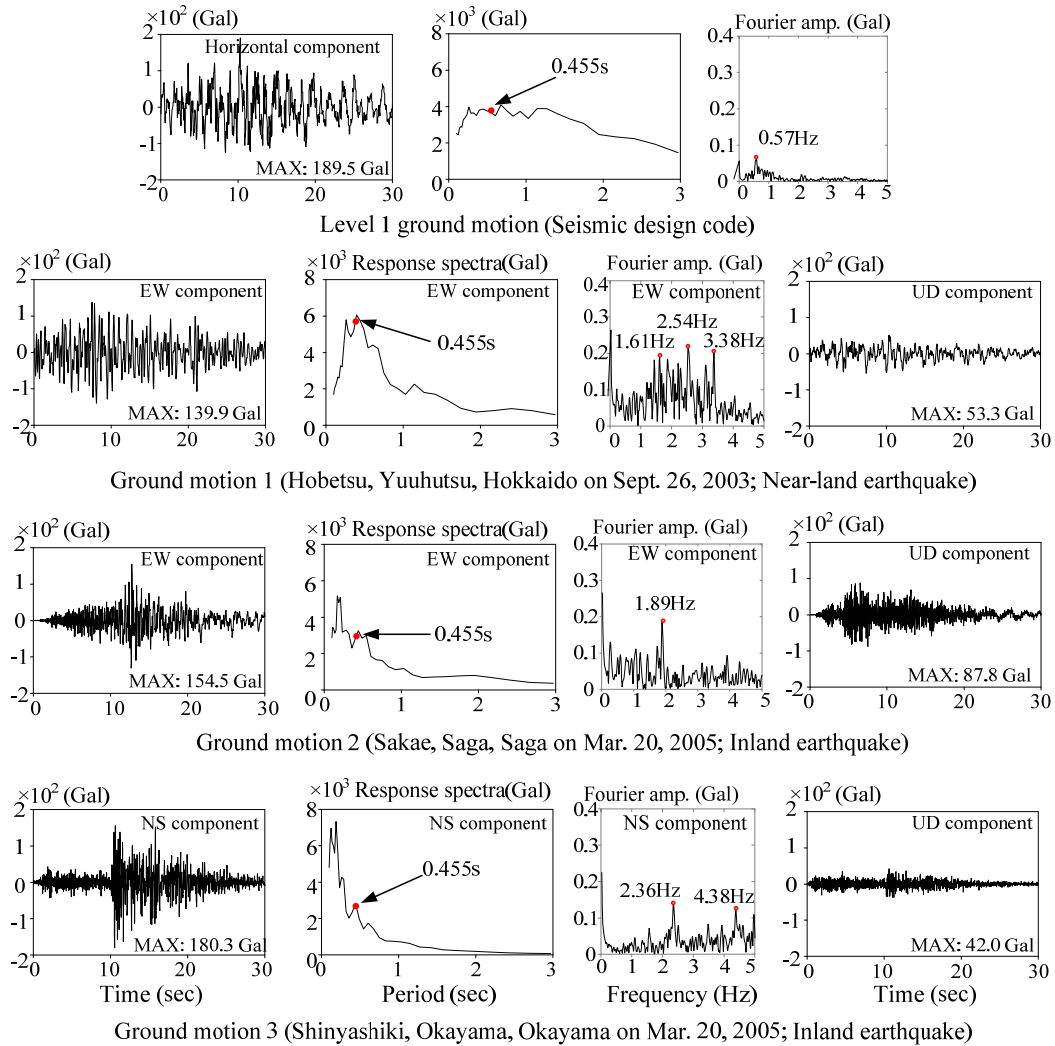


Fig. 5 Ground motions

Table 1 Variants employed in train model

Definition (j^{th} car)	Notation
Lateral translation of car body	y_{j1}
Sway of front bogie	y_{j21}
Sway of rear bogie	y_{j22}
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}
Yawing of car body	θ_{jz1}
Yawing of front bogie	θ_{jz21}
Yawing of rear bogie	θ_{jz22}

Table 2 Dimension of the bullet train

Distance of centers of bogies	λ_x	17.5 m
1/2 distance of centers of bogies	λ_{x1}	8.75 m
1/2 distance of axes	λ_{x2}	1.25 m
1/2 width of track gauge	λ_{y1}	0.7 m
1/2 distance of vertical lower springs	λ_{y2}	1.0 m
1/2 distance of vertical upper springs	λ_{y3}	1.23 m
1/2 distance of longitudinal upper springs	λ_{y4}	1.42 m
Distance from centroid of body to axis	λ_z	0.97 m
Distance from centroid of body to lateral upper spring	λ_{z1}	0.5 m
Distance from centroid of bogie to lateral upper spring	λ_{z2}	0.37 m
Distance from centroid of bogie to lateral lower spring	λ_{z3}	0.1 m
Radius of wheel	r	0.43 m

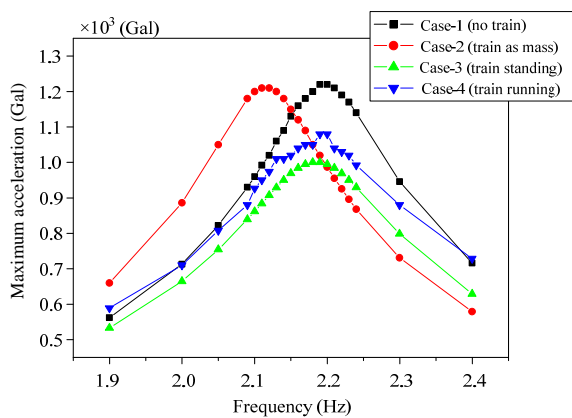


Fig. 6 Bridge responses under sine waves

Table 3 Properties of the bullet train

Definition	Notation	Value
Weight of car body	w_1	321.6 kN
Weight of bogie	w_2	25.9 kN
Weight of wheel	w_3	8.8 kN
Mass moment of inertia of car body	I_{x1}	49.2 kN·s ² ·m
	I_{y1}	2512.6 kN·s ² ·m
	I_{z1}	2512.6 kN·s ² ·m
Mass moment of inertia of bogie	I_{x2}	2.9 kN·s ² ·m
	I_{y2}	4.1 kN·s ² ·m
	I_{z2}	4.1 kN·s ² ·m
Spring constant	k_1	5000 kN/m
	k_2	176.4 kN/m
	k_3	443 kN/m
	k_{21}	17500 kN/m
	k_{22}	4704 kN/m
	k_{23}	1210 kN/m
Damping coefficient	c_2	39.2 kN·s/m
	c_3	21.6 kN·s/m
	c_{23}	19.6 kN·s /m

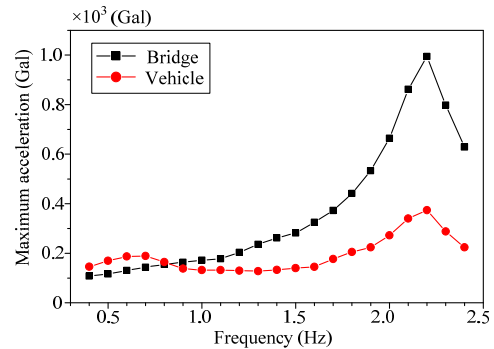


Fig. 7 Bridge and train responses

中央ブロックにおける走行車線側で張り出し部に最も近い L1 pier の基部曲げモーメントについて行う。

3. 2 列車モデル

本研究では、車体や台車などの構造を剛体と見なし、車両を質点-ばね-ダンパ振動系に理想化する。新幹線 300 系車両一両に対し、Fig. 4 に示した車体および前後台車の上下振動(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)を考慮した 15 自由度振動系としてモデル化する。車両モデルにおける自由度の定義、寸法および動的諸元について、それぞれ Table 1, Table 2 および Table 3 に示す。

列車と橋梁との動的相互作用問題において、車両と構造物との連成を精確に再現するために、特に大地震時など車輪とレールとの相対変位が大きいと想定される場合、車輪とレールとの形状を適切に考慮してその動的接触をモデル化する必要があるが、非常に複雑な現象で多大な労力が必要となる。本研究で現段階において、構造物が比較的に弱い地震動による線形挙動を想定し、車輪とレールとの相対変位が小さいと仮定し、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により、その連成を表現することとする。

3.3 正弦加振波

本研究では、地震動周波数特性の橋梁応答への影響を解明するため、正弦波による地震応答解析を行う。 A 、 ω 、 f および t をそれぞれ振幅、円振動数、振動数および時間とすると、正弦波の定義は、 $A_g(t) = A \sin(\omega t)$ で表される。ここで、 $\omega = 2\pi f$ となる。用いる正弦波は、対象振動数を橋梁の水平一次固有振動数や車両の固有振動数周辺で変化させ、振幅 A を100 Galに設定する。解析の際に、正弦波を水平の橋軸直角方向のみに作用させ、解析時間は10秒とする。

3.4 入力地震動

本解析に用いる入力地震動は、耐震設計標準¹⁾で定められたLevel 1地震動の中から橋梁の地盤種別に対応したものを一波、K-netによる観測地震波から振幅がLevel 1地震動に近い、加速度応答スペクトル特性が異なる三波を選ぶ。Fig. 5に各地震波の水平(EW, NS)および鉛直(UD)成分の時刻歴波形を示す。水平成分について加速度応答スペクトルおよびフーリエスペクトルも示す。Level 1地震動の鉛直成分は設計標準¹⁾により水平成分の半分の値とする。ここで、Ground motion 1は2003年9月26日に北海道勇払郡穂別町で、Ground motion 2は2005年3月20日に佐賀県佐賀市栄町で、Ground motion 3は2005年3月20日に岡山県岡山市新倉敷でそれぞれ記録されたものである。Fig. 5の応答スペクトルに示している固有周期の0.455秒は橋梁の水平一次振動の固有周期である。なお、K-net地震波について、観測地点における地盤条件ができるだけ対象橋梁周辺地盤と近いものを選んでいく。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に地震荷重を作用させ、解析時間は30秒とする。なお、地震動は直接に基礎における地盤波として入力する。

4. 解析結果による地震応答評価

4.1 解析ケース

列車が振動系としての橋梁地震応答に対する動的効果を明らかにするために、以下の4解析ケースを設定する。そして、前述正弦波および地震波を用いてそれぞれのケースに応じる解析を行う。

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 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270km/hで走行する。この場合、列車が高速であるため、実際の16両編成列車は有限長さの橋梁モデルを非常に短い時間で通過してしまい、地震時における車両の動的影響を十分に考慮することが困難である。そのため、解析時間中に車両が橋梁上を絶えずに走行するように仮定する。この仮定により、橋梁の地震応答に対する列車走行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正確に考慮するために、将来計算能力の向上に伴い実際の状況を反映した解析モデルを用いる必要があるが、本論文で用いた橋梁モデルの中央ブロックに対し、列車通過時に最大地震動を受ける最も不利な状況を想定すれば、本解析結果は依然有益であると考えられる。

4.2 正弦波による解析結果

地震動周波数特性が橋梁と車両連成系の地震応答に与える影響を確認するため、上記4ケースについて正弦波による結果をFig.6とFig.7に示す。

Fig. 6は、正弦波の振動数(横軸)に対し、橋梁中央点における水平方向の最大加速度応答(縦軸)を示したものである。対象振動数は橋梁の水平一次固有振動数である2.22Hzを含む1.9~2.4Hz間で変化させ、全16波を用いる。全体的に車両を振動系とする場合では、橋梁のみの場合の地震応答より小さく、車両がダンパーとして働く現象を確認できる。Fig. 6における応答値は、2.16HzあたりでCase-1とCase-2、2.18HzあたりでCase-2とCase-4、2.20HzあたりでCase-2とCase-3との大小関係が入れ代わっている。この現象から、列車荷重を付加質量として考慮する場合、ある周波数以上の周波数領域に対し、橋梁のみ及び車両を振動系とする場合と比べ、橋梁の地震応答を過小に評価する可能性が伺える。

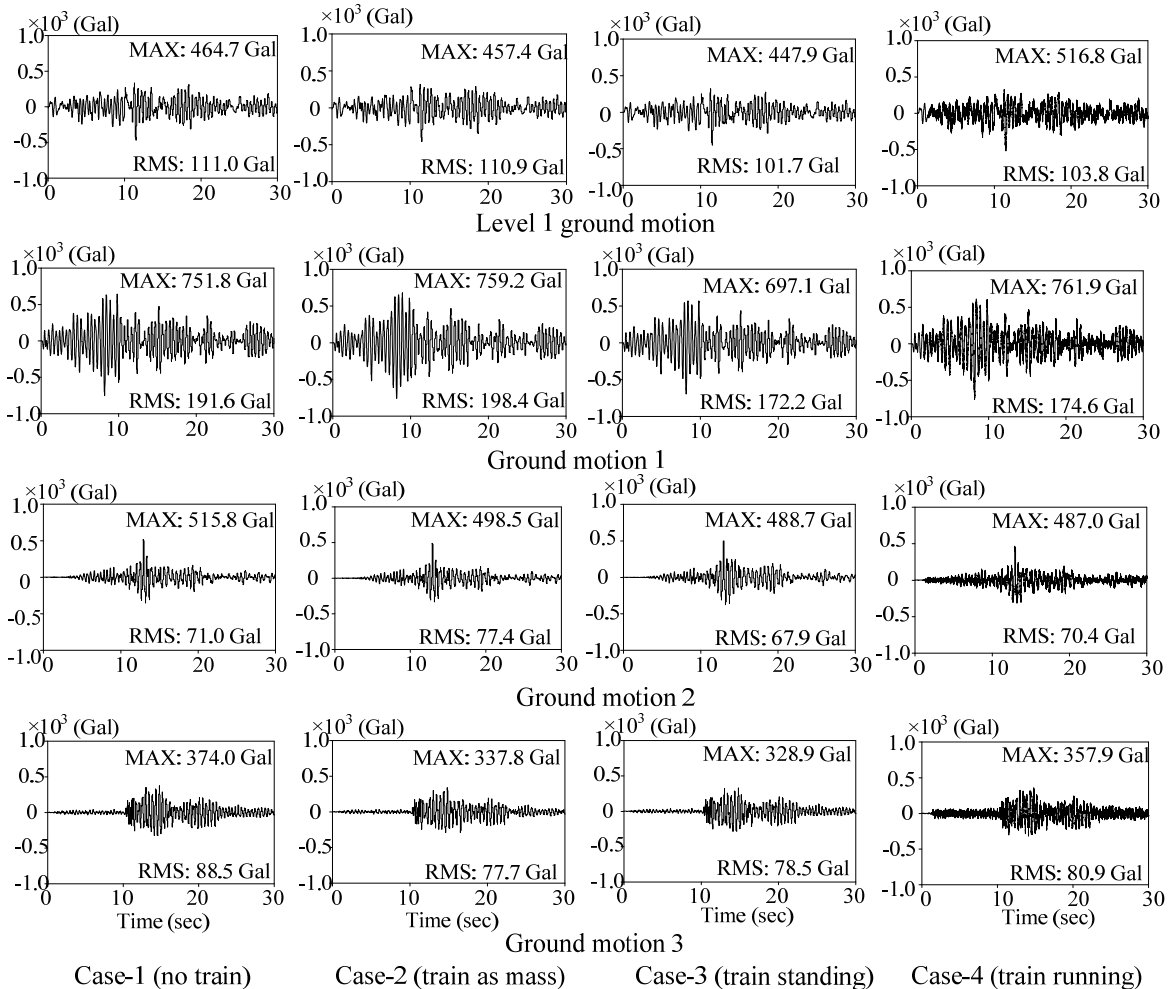


Fig. 8 Seismic acceleration response of the bridge

Fig. 7 は、Case-3 において、橋梁上に停車している車両の車体部分の応答と橋梁中央点応答と比較したものである。正弦波は 0.4~2.4Hz 間で 0.1Hz 間隔に作用させる。車両の水平一次固有振動数である 0.81Hz 付近で車両応答が橋梁応答を上回っているが、橋梁水平一次固有振動数付近での応答は小さく、車両の走行安全性について構造物の振動特性の方が大きく影響するといえる。

4. 3 地震波による解析結果

4. 3. 1 加速度応答

設計および実測地震波による各解析ケースの橋梁水平加速度応答結果を Fig. 8 に示す。地震波によって応答の大小が異なり、特に Ground motion 1 において比較的大きな値となっている。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である 0.455 秒付近で最も卓越している現象を反映している。そして正弦波の結果と同

様に、全体的に車両が振動系とする場合の地震応答が、橋梁のみの場合より小さく、車両がダンパーとして働くことが分かる。

Case-2 と Case-3 と比較すると、MAX, RMS 値とも概ね付加質量の場合に大きい。Ground motion 3 において、RMS 値が振動系とする場合に大きくなっているケースもある。また、Case-1 と Case-2 と比較すると、橋梁のみの場合の応答が付加質量の場合より、大きくなっているケースがあり、列車荷重を付加質量と見なすことが必ずしも絶対に橋梁応答を安全側に評価するわけではない。これは、正弦波解析による結果の傾向と一致する。一方、MAX 値を見ると、Level 1 ground motion および Ground motion 1 において Case-4 で最も大きい値となっており、地震波の周波数特性のみならず、車両走行の影響も橋梁一車両連成系の地震応答に一定の影響を及ぼすことがわかる。

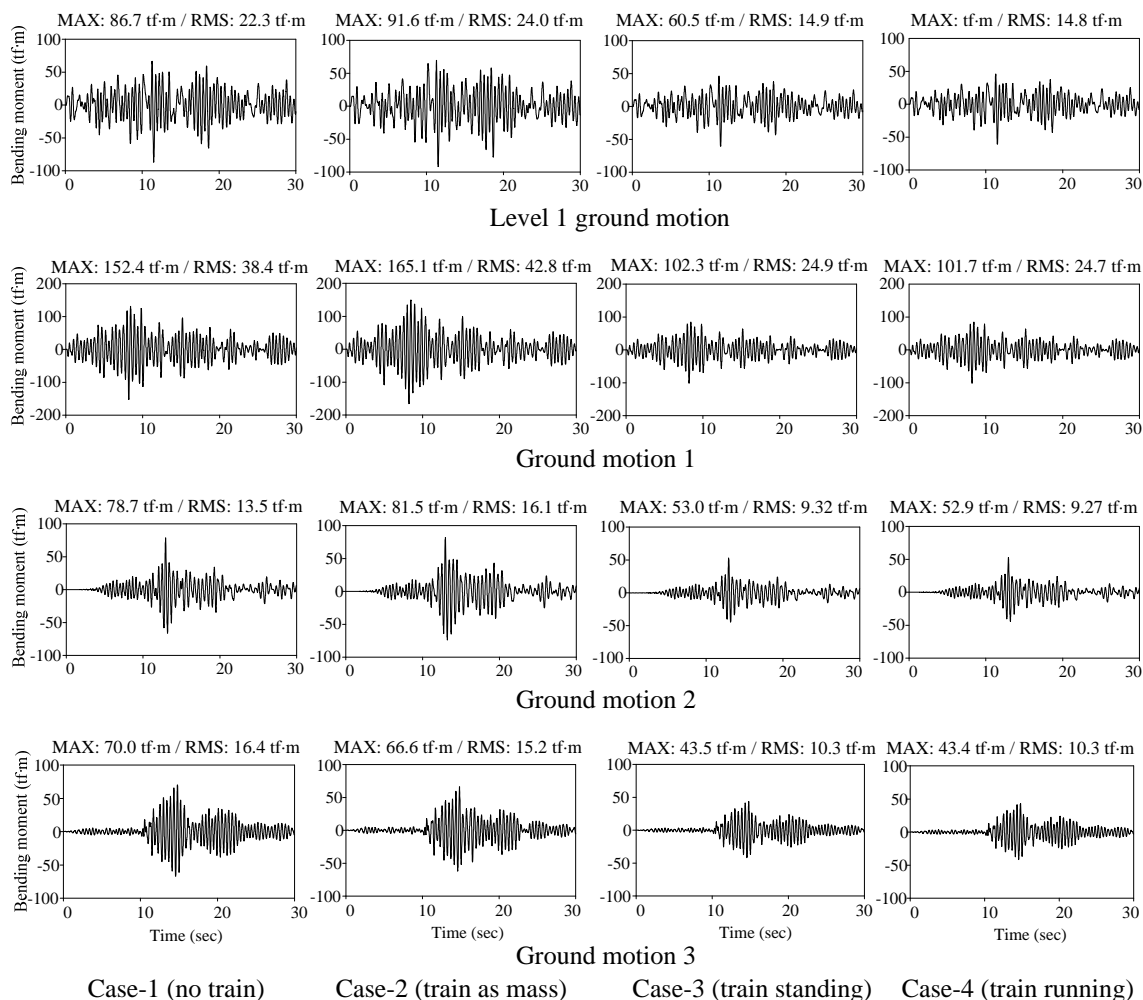


Fig. 9 Cross-sectional moment responses at the pier bottom

4. 3. 2 橋脚断面力

橋脚基部 (L1 pier) で発生する断面曲げモーメントを Fig. 9 に示す。断面力について、概ね加速度応答に近い傾向を示しているが、車両がダンパーとして働くことにより、振動系として考慮する場合の断面力は、橋梁のみや付加質量とする場合より、減少の度合いが大きいことが分かる。ほかの3波で列車荷重を付加質量として考慮する場合 (Case-2) が最も大きな断面力を示すのに対し、Ground motion 3 では橋梁のみ(Case-1)の場合が最も危険と伺える。この結果からも、車両を単に付加質量として考慮することは、橋梁耐震性能を必ずしも安全側に評価するだけでなく過小評価する可能性もあり得ることを示唆している。

5. 結論

本研究では、Level 1地震時における鉄道高架橋と列車連成系の地震応答解析手法を構築した上で、列車荷重の有無や付加質量および振動系とする種々の条件下で、実測地震波さらに正弦波を用いて橋梁地震応答評価を行い、高架橋地震応答に対する列車の動的効果および地震動周波数特性の影響について検討した。その結果、橋梁の地震応答に対して車両がダンパーとして働く現象を確認した。そして、正弦波を用いた解析結果より、列車荷重を付加質量として考慮する場合、ある周波数以上の地震動に対し、橋梁のみ及び車両を振動系とする場合と比べ、橋梁の地震応答を過小評価する可能性があることを示した。さらに、設計地震波および実測地震波による解析結果でも、同様な現象を確認した。

解析による地震応答評価の結果，列車を単なる付加質量として考慮することは，地震動の特性によって橋梁地震応答を過大評価および過小評価の何れの可能性もあることがわかった。以上の分析により，鉄道高架橋の耐震設計において列車荷重の動的影響が複雑であり，理論および解析手法の進歩によってさらに検討する必要性を示唆した。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 亀田弘行，室野剛隆，南荘淳，佐々木伸幸：橋梁一車両連成系による道路橋の地震応答特性，土木学会論文集，No. 626/I-48，pp. 93-106，1997.7.
- 3) 涌井 一，松本信之，松浦章夫，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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) Kawatani, M., He, X., Shinagawa, K. and Nishiyama, S.: Influence of Bullet Train as Dynamic System on Seismic Performance of Shinkansen Viaducts, *Proc. of The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS'08)*, pp. 3174-3182, Seoul, Korea, July 13-17, 2008.
- 9) Kawatani, M., He, X., Shinagawa, K. and Yamazaki, M.: Influences of Ground Motion Frequency Characteristics on Seismic Responses of Shinkansen Viaducts under Train Load, *Proc. of the 5th International Symposium on Steel Structures (ISSS'09)*, Seoul, Korea, March 12~14, 2009.
- 10) 吉田幸司，関 雅樹：RCラーメン高架橋の柱剛性向上による鉄道振動への影響，構造工学論文集，Vol. 50A, pp. 403-412, 2004. 3.