

鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究

A Study on Improvement for Seismic Behavior of Railway Viaducts using Steel Damper and Braces

松本 信之* 曾我部 正道** 岡野 素之***
 涌井 一**** 大内 一*****

Nobuyuki MATSUMOTO, Masamichi SOGABE, Motoyuki OKANO
 Hajime WAKUI, Hime OHUCHI

*M.S. 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 主任技師 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

**鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 コンクリート構造 技師 (同上)

***大林組技術研究所 土木第4研究室 主任研究員 (〒204-0011 清瀬市清戸4-640)

****工博 鉄道総合技術研究所 ラダー線路システム推進室 部長 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

*****工博 大林組技術研究所 土木第4研究室 室長 (〒204-0011 清瀬市清戸4-640)

Derailments of running trains due to transverse lateral vibrations of elevated RC viaducts occurred during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. It is essential to take into account the running safety of train during earthquakes for studying the design philosophy and strengthening methods of railway structural systems.

A dynamic interaction analysis between railway vehicles and structures, which took into account the variations of characteristics was conducted. It was revealed effective, from the analysis, to improve the running safety of train during earthquakes by making the natural frequency of structures higher than 2 Hz to keep it away from the natural frequency of vehicle in the lateral direction (i.e. approximately 1 Hz) and/or restraining the transverse lateral vibration as small as possible.

Based on the analytical results, a new type of railway viaduct was proposed. In the new viaduct, a lightweight precast concrete girder is adopted as superstructure and a reinforced concrete frame bent composed with steel braces and a shear-panel type damper using mild steel is adopted as infrastructure. They are used to obtain higher natural frequency and larger damping performance.

In this study, the performance of new viaduct on the running safety of train was evaluated.

Keyword: railway viaduct, steel damper, braces, running safety

1. はじめに

ビームスラブ式RCラーメン高架橋は最も代表的な鉄道構造物である。しかし近年、兵庫県南部地震を契機に、より高い耐震性と列車走行性が求められるようになり、併せて、高騰する労務費に対する低コスト化も図らねばならなくなってきた。

特に注目すべき点として、先の兵庫県南部地震では、高架橋の横振動が原因で脱線した事例が報告されたことが挙げられる¹⁾。列車の地震時の走行安全性を確保することは、今後の鉄道構造システムの新設・改修を考える上で、重要な課題の一つであるといえる。

別途行われた^{2,3)}、地震波、地震規模、地盤種別、構造物の固有振動数、地震波入力位相差、列車の振動系等をパラメータとした車両の応答解析からは、地震時の走行安全性を向上させるには、構造物の固有振動数を2Hz以上として車両の横方向固有振動(1Hz)と離すこと、レール位置での水平変位量を可能な限り抑えることが重要である、との結果が得られている。

この検討結果を踏まえて、今後的高架橋構造として提

案されたのが、図-1に示す新形式鉄道高架橋である。この高架橋では、上部構造には、質量を軽くし固有振動数を高めるために、単線分を支持する軽量のプレキャストPRC桁を採用した。下部構造には、高剛性化(高固有振動数)及び高減衰化を経済的に図るために、従来のRC門型橋脚に鋼製ブレースと低降伏点鋼を用いたダンパーを取り付けた形式とした。

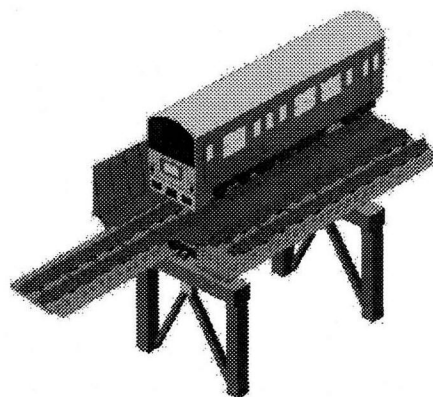


図-1 新形式高架橋の概念図

本研究では、この鋼製ブレース・ダンパーを用いた新形式鉄道高架橋について、その列車走行性の改善効果を数値解析により定量的に評価することを研究の目的とした。

2. 新形式鉄道高架橋

本構造は、図-1に示したように、軽量のPRC桁を門型ラーメン橋脚（以下RC架構と略す）で支持した構造である。軌道構造は、軽量・防振軌道であるフローティング型ラダー軌道で、上部構造は、この軌道の単線分を支持するプレキャストPRC桁を主構造とし、橋側歩道などの軽い付帯構造を取り付けた構造となっている。線路単位長さ当たりの上部構造重量（軌道・付帯構造を含む）を従来のビームスラブ式ラーメン高架橋の約1/2とすることにより、基礎構造に負担を掛けることなく、高降伏震度と高剛性を確保している。

一方、下部構造は、RC架構の内側に逆V型の鋼製ブレースを配置し、横梁とブレースの間にダンパーを設けた形式となっている。ダンパーは、経済性、維持管理性、必要とされる剛性等を考慮し、せん断降伏型の鋼製リンク材（パネル型）とした³⁾。

本構造形式の設計概念を図-2に示す。弾性領域では、高い剛性により列車走行性が確保される。この場合、リンク材とブレースは弾性で、RC架構は鉄筋が降伏しない状態である。上部構造の軽量化が図られているため、従来に倍するまで降伏点震度を高めることができる。次に鋼製リンク材が降伏するが、RC架構の鉄筋降伏まで大きな減衰効果を期待することができる。この段階まで高架橋の水平変位を大きく抑制し、列車の走行性を確保することができる。鉄筋降伏後はRC架構も減衰効果を発揮し高い耐震性能が確保できるようになる。鉄筋降伏後は、全体系の応答塑性率も増大するが、降伏点が高く、降伏時の応答変位自体も小さい為、終局時の応答変位は、従来のラーメン高架橋に比べて大幅に小さくなる。

以上が新形式鉄道高架橋の基本概念であるが、本構造は上記以外に以下のような特徴を有している。

- ①水平剛性が高く、地中梁を省略するような場合に、容易に剛性補強を行うことができる。
- ②リンク材の交換が可能で大地震後の復旧が容易である。またその際にブレース材を反力として残留変形の補正が可能である。
- ③既存高架橋の耐震補強工法としても適用可能である。

3. 検討手法

検討手法としては、まず、構造物の非線形応答解析を実施し、高架橋レール面での応答値を算出し、その解析結果を列車車輪に入力して車両側の応答を計算する手法を用いた。従って解析上、車両と構造物の動的相互作用

用力については考慮されていない。動的相互作用力は本研究の結果を大きく変化させないと思われるが、この要因については、今後、別途報告したいと考えている。

3. 1 構造物応答解析

解析対象構造物としては、軽量桁と鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式鉄道高架橋（Case1）、同じ構造形式であるが鋼製ブレース・ダンパーを用いない新形式鉄道高架橋（Case2）、従来型のラーメン高架橋（Case3）の3種類を選択した。ただし、問題の単純化のために、全ての構造形式において、基礎構造は無視することとした。従ってこれらの解析結果は、強固な地盤上の直接基礎構造物に相当すると言える。

構造物の具体的な解析手順を以下に示す。

- ①全体系の荷重変位骨格曲線を、仮定した配筋量に基づ

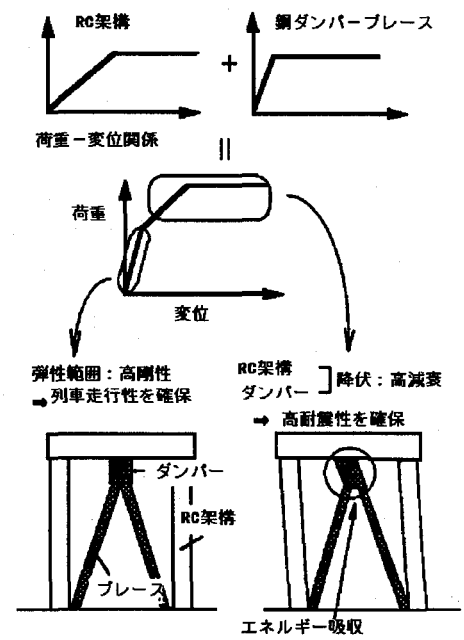


図-2 新形式高架橋の設計概念

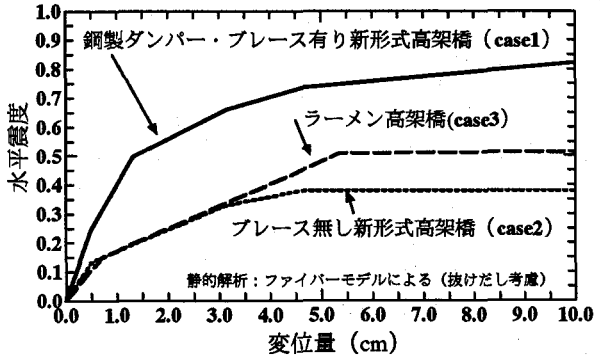


図-3 各構造物の骨格曲線と動的解析モデル

き、ファイバーモデルを用いた静的非線形解析により算定した。ここで、RC架構基部の鉄筋の抜け出しについては、バネ要素を用いて考慮した⁹⁾。鋼製ダンパーの強度については、以下の文献⁹⁾のモデルで算定した。

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} \quad (1)$$

$$\tau_{cr} / \tau_y = 102 / (\overline{D/tw} - 0.26) + 0.60 \quad (2)$$

$$\overline{D/tw} = (D/tw) \sqrt{f_y / E_s} \quad (3)$$

ここに、 τ_y : パネルのせん断降伏応力度
 τ_{cr} : パネル塑性座屈応力度
 tw : ウェブ厚、 D : 補強スチフナー間距離
 f_y : 鋼材降伏点、 E_s : 鋼材ヤング係数

②得られた全体系の荷重変位曲線を直線近似したものを図-3に示す。RC架構については、2折れ3直線のトリリニア骨格線(履歴ループ:ディグレイディングトリリニア型)で、鋼製ダンパーについては、1折れ2直線のバイリニア骨格線(履歴ループ:標準バイリニア型)でそれぞれモデル化した。これ等に基づき全体構造系を1質点と見なした動的非線形解析を行い、レール面での構造物の時刻歴応答を算出した。

3. 2車両応答解析⁷⁾

(1)車両モデル

車両モデルの概念図を図-4に示す。車体、台車枠、車輪軸をそれぞれ剛体の質点と見なし、これをバネ及びダンパーで結合した車両モデルを用いた。各構成要素間には、著大な相対変位を抑制するためのストッパが設けられている。これを考慮できるよう、バネ・ダンパーは、原点指向バイリニア型の非線形特性とした。

車体5自由度(水平: y 、鉛直: z 、ロール: ϕ 、ピッチ: θ 、ヨー: ψ)、台車5自由度(水平: y_t 、鉛直: z_t 、ロール: ϕ_t 、ピッチ: θ_t 、ヨー: ψ_t) $\times 2$ 、車軸4自由度(水平: y_w 、鉛直: z_w 、ロール: ϕ_w 、ヨー: ψ_w) $\times 4$ で、合計31自由度の精密で信頼性の高い⁹⁾車両モデルを構築した。

車両の主要な入力諸元を表-1に示す。解析対象車両には、新幹線100%乗車と通勤列車350%乗車1両の2種類

表-1 解析に用いた車両モデルの主要諸元

名 称	記号	単位	新幹線	通勤電車
半車体質量	m	$tf \cdot s^2/m$	1.633	2.719
台車枠質量	m_T	$tf \cdot s^2/m$	0.310	0.351
輪軸質量	m_w	$tf \cdot s^2/m$	0.182	0.147
左右枕バネ定数	K_2	kN/m	176.5	183.4
同減衰定数	C_2	$kN \cdot s/m$	39.2	58.8
上下枕バネ定数	K_3	kN/m	264.8	318.7
同減衰定数	C_3	$kN \cdot s/m$	45.1	26.5
左右軸バネ定数	K_{wy}	kN/m	4707.4	3187.3
上下軸バネ定数	K_{wz}	kN/m	1176.8	924.8
同減衰定数	C_{wz}	$kN \cdot s/m$	39.2	25.5
静輪重	P_s	kN	55.4	80.9

を用いることとした。前者は軽量車両を、後者は重量車両をそれぞれ想定している。

(2)車輪-レール間モデル

車輪-レール間のモデルには、図-5に示すように、鉛直フランジを有する車輪軸が遊間を持って軌道上を走行する大振幅の蛇行動モデルを適用している。車輪-レール間の計算上の構成則は以下の通り。

①鉛直方向構成則としては、車輪とレールの接触を判定し、接触時にはヘルツの接触バネを適用する。非接触時には、作用力は無いものとする。

②水平方向構成則としては、車輪踏面とレール頂部の接触点の間でクリープ力(すべり力)を適用する。クリープ力は、車輪がレール上を転がりながら進む時、車輪・レール接触面でのクリープ(すべり)により発生する接線力で、横方向クリープ力は式(4)のようにモデル化できる。このクリープ力はすべり率が大きくなると摩擦力を上限として飽和する。

$$Q_c = -C \cdot S_y \quad (4)$$

ここに、 Q_c : クリープ力による車輪横圧
 S_y : 横方向すべり率、 C : クリープ係数

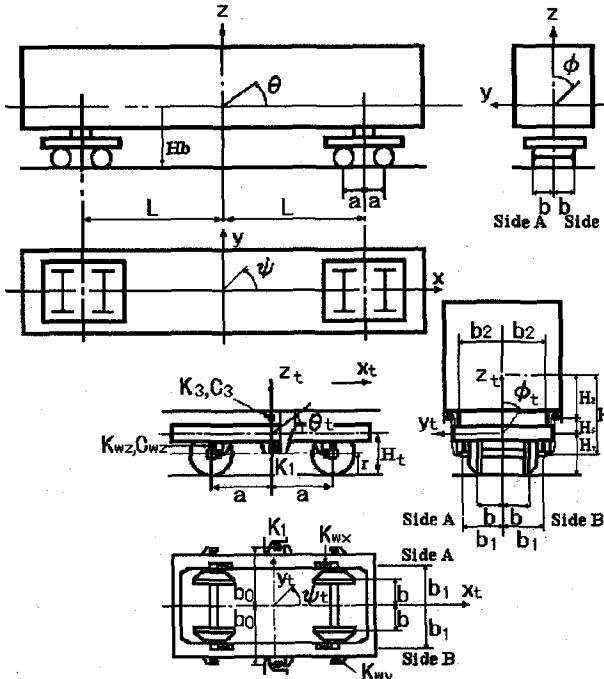


図-4 車両解析モデル

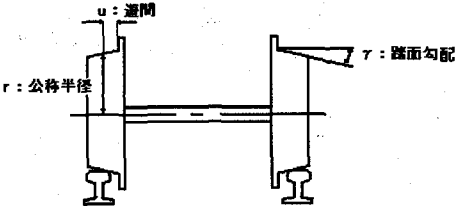


図-5 車輪の解析モデル

$$S_y = (\pm \dot{y}_w + r \dot{\Phi}_w - v \dot{\Psi}_w) / v \quad (5)$$

ここに、 v : 列車速度、 r : 車輪公称半径

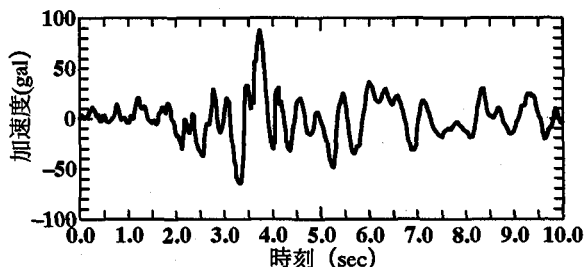
また、車輪とレールとの相対水平変位が、図-5に示す遊間以上となり、車輪フランジとレール肩とが接触した場合には、レール締結装置の小返りバネより、フ

ランジ圧を求める。

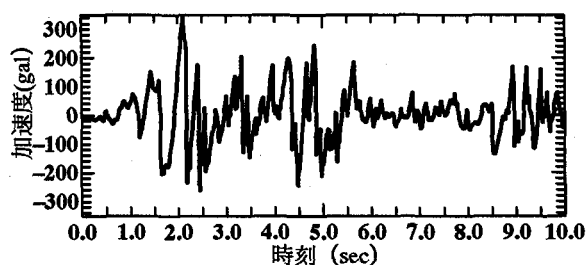
車輪とレール間に働く車輪横圧は、クリープ力とフランジ圧の和となる。

3. 3地震波

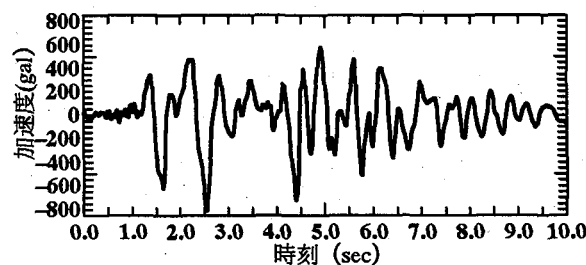
解析に用いた地震波及びそれぞれの地震波のフーリ



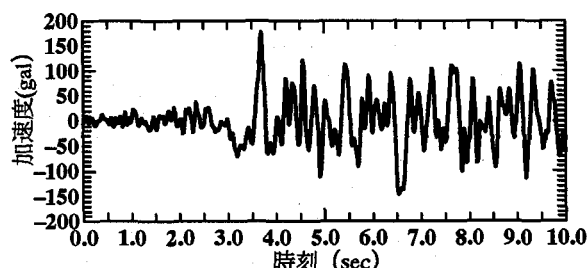
(a) 八戸波 NS成分の加速度波形



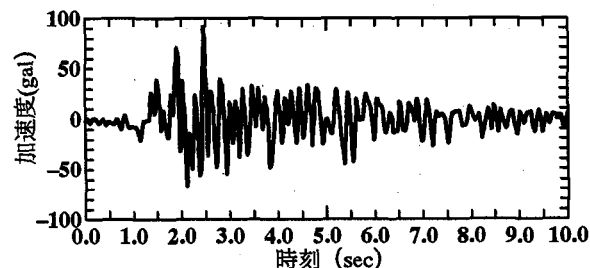
(b) エルセントロ波 NS成分の加速度波形



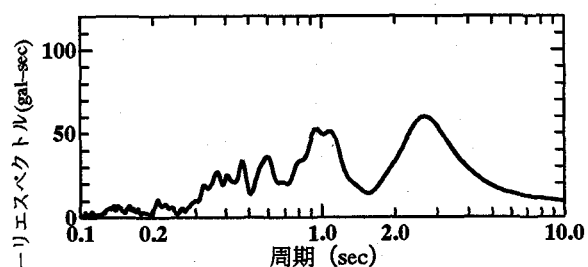
(c) 神戸波 NS成分の加速度波形



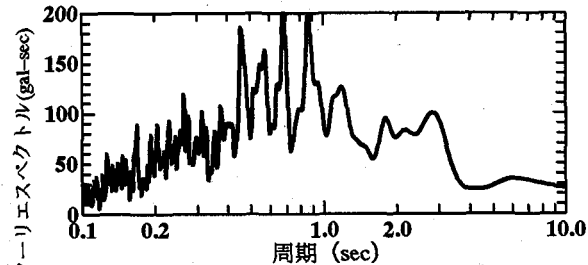
(d) タフト波 EW成分の加速度波形



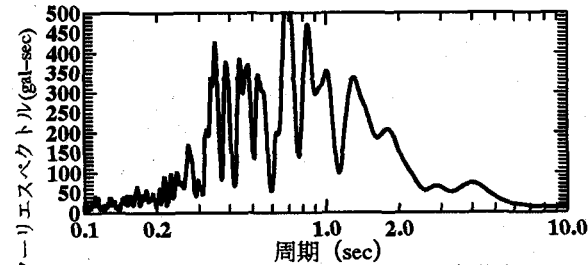
(e) 新菊川波 EW成分の加速度波形



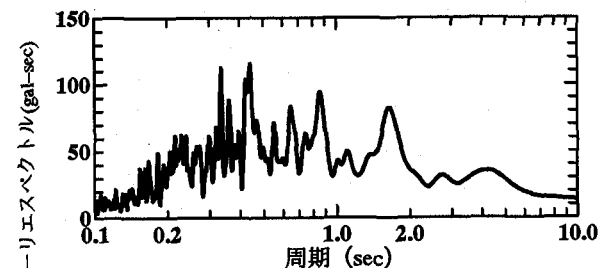
(f) 八戸波 NS成分のフーリエスペクトル



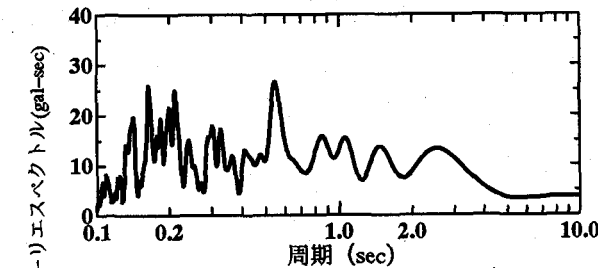
(g) エルセントロ波 NS成分のフーリエスペクトル



(h) 神戸 NS成分のフーリエスペクトル



(i) タフト EW成分のフーリエスペクトル



(j) 新菊川波 EW成分のフーリエスペクトル

図-6 解析に用いた地震波とそのフーリエスペクトル

エスペクトルを図-6に示す。長周期から順に八戸，エルセントロ，神戸，タフト，新菊川の5種類の実地震波を用いることとした（以下図中でHA，EL，KO，TA，KIと略す）。ここでは単純化の為，地盤応答特性は考慮せずに元波形の振幅のみ線形倍し最大入力加速度が全て500galとなるように統一した。

3. 4 列車走行性の評価指標

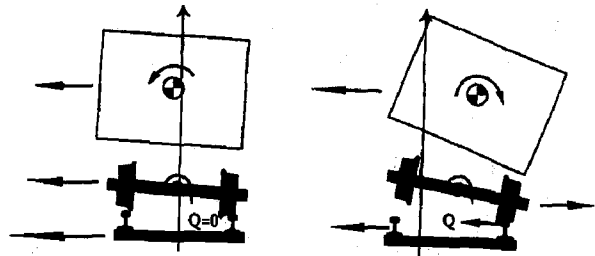
(1) 軌道部材の耐荷力

軌道部材の耐荷力は主として，レール締結装置のそれから求まるもので，ここでは車輪横圧を評価指標として用いた。その限度値は70～100kN程度とされているが，軌道構造形式により異なる。

(2) 飛び上がり脱線

飛び上がり脱線（上心ロール：図-7(a)参照）は，1.4Hz以上の振動数で卓越する脱線モードで，ここでは脱線係

数 Q/P を評価指標として用いた。脱線係数は車輪の横圧 Q を動的な輪重 P で除した値であり，古くから脱線の指標として用いられている。本検討のような鉛直フランジを有する車両モデルの場合，その限度値は，別途行われたシミュレーション³⁾結果から，式(6)のように推定できる。



(a) 飛び上がり脱線 (b) 足上げ脱線

図-7 鉄道車両の脱線モード³⁾

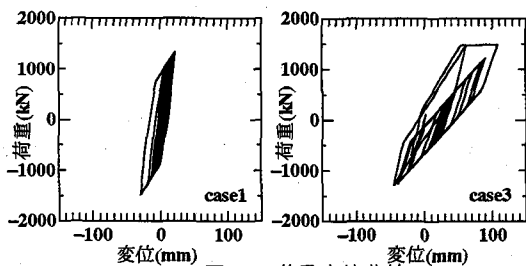


図-8(a) 荷重変位曲線

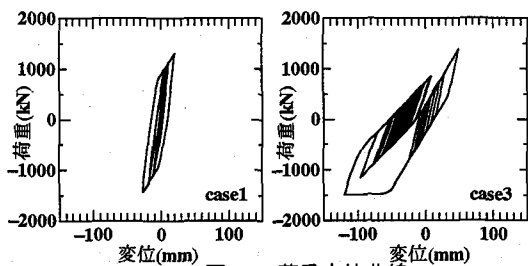


図-9(a) 荷重変位曲線

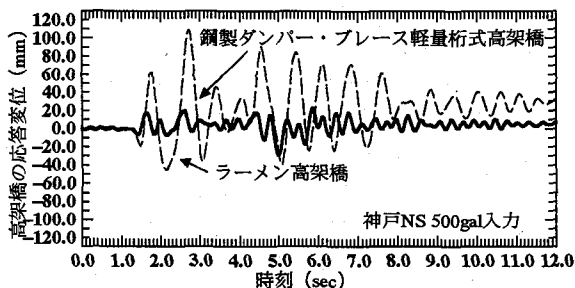


図-8(b) 高架橋レールレベルの応答変位

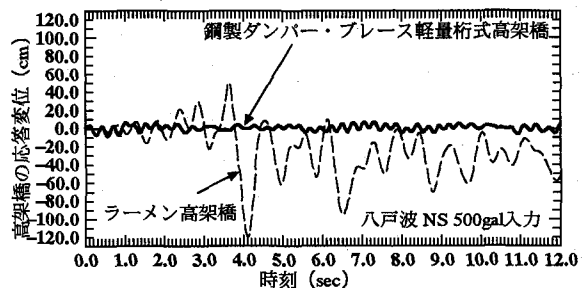


図-9(b) 高架橋レールレベルの応答変位

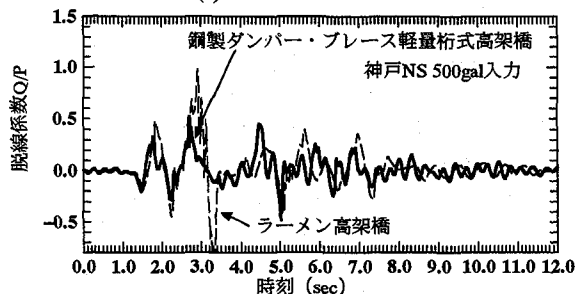


図-8(c) 飛び上がり脱線，脱線係数 Q/P （新幹線）

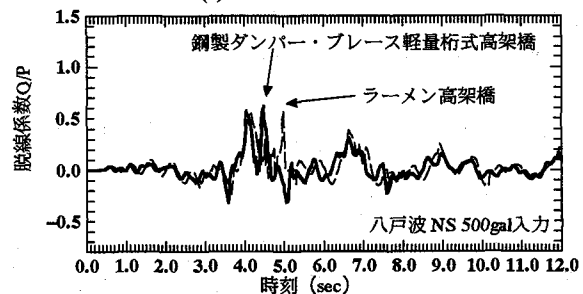


図-9(c) 飛び上がり脱線，脱線係数 Q/P （通勤電車）

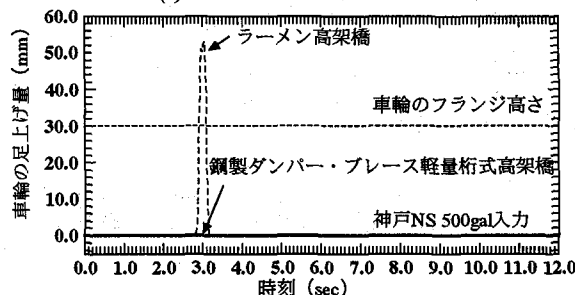


図-8(d) 足上げ脱線，車輪の足上げ量（新幹線）

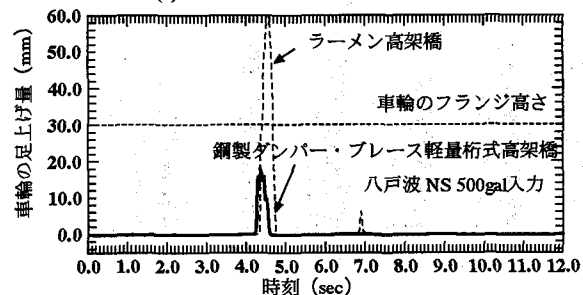


図-9(d) 足上げ脱線，車輪の足上げ量（通勤電車）

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1.0\text{Hz未満} & Q/P=1.0 \\ 1.0\sim 1.8\text{Hz} & Q/P=1.875f-0.875 \\ 1.8\text{Hz以上} & Q/P=2.5 \end{array} \right. \quad (6)$$

(3) 足上げ脱線

足上げ脱線（下心ロール：ロッキング振動：図-7(b)参照）は、0.7Hz未満で卓越する脱線モードで、ここでは車輪のレールからの浮き上がり量を評価指標として用いた。その限度値は、車輪が有するフランジ高さ30mmとした。

4. 応答解析結果

4.1 時刻歴応答波形

時刻歴応答波形の例として、図-8に神戸波NS500gal入力の新幹線の場合を、図-9に八戸波NS500gal入力の通勤電車の場合をそれぞれ示す。

図-8(b)、図-9(b)の高架橋レールレベルの応答変位波形から、鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋が、ラーメン高架橋に比べて変位を大きく抑制できること、振動波形自体も短周期化されることが読みとれる。

図-8(c)飛び上がり脱線、脱線係数Q/P（新幹線）の例から、新幹線車両の場合、鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋では、評価指標である脱線係数Q/Pを5割程度にまで低減できることがわかる（脱線係数は正側の値が有意）。Q/Pの限度値自身も式(6)のように周波数に依存するため、改善効果は更に高まることとなる。図-8(b)のレールレベルの最大応答変位発生時刻と図-8(c)のQ/P最大値の発生時刻はほぼ一致している。

通勤電車の場合は（図-9(c)）、鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋とラーメン高架橋は、同程度の脱線係数Q/Pである（脱線係数は正側の値が有意）。

図-8(d)、図-9(d)足上げ脱線／車輪の足上げ量の例から、新幹線車両、通勤電車ともに、鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋では、評価指標である足上げ量が著しく小さいことが分かる。

図-8(b)、図-9(b)のレールレベルの最大応答変位発生時刻と図-8(d)、図-9(d)の足上げ量の最大値の発生時刻はほぼ一致している。

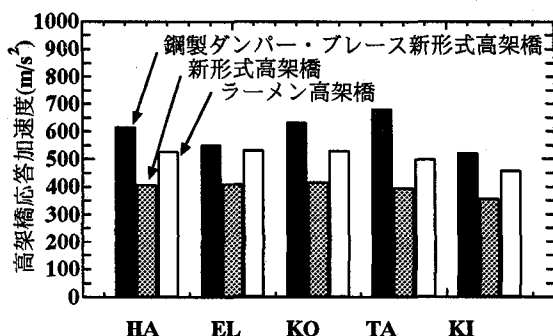


図-10 高架橋レールレベルの応答加速度

4.2 構造物応答解析の結果

図-10に高架橋レールレベルでの応答加速度の最大値を比較して示す。鋼製ダンパー・ブレースを有する新形式高架橋は、他の構造形式に比べて応答加速度が大きい。これは、軽量化・高剛性化により降伏点震度が高まっているためである。

図-11に高架橋の応答変位を示す。鋼製ダンパー・ブレースを有する新形式高架橋は、他の構造物に比べて変位抑制効果が非常に大きいことが分かる。

4.3 走行性応答解析の結果

(1) 軌道部材の耐力評価

図-12に車輪横圧を示す。新幹線の場合、長周期（卓越周期1.0秒以上）の八戸波、中周期（卓越周期0.5～1.0秒）のエルセントロ波において、鋼製ダンパー・ブレースを用いた高架橋の走行性改善効果が大きい。短周期（卓越周期0.5秒以下）のタフト波、新菊川波などでは、改善効果が小さいか、場合によっては逆転しているが、これらの短周期の地震波は、応答値自体が小さい。

一方通勤電車においては、構造形式による差異はほとんどみられない。全ての構造形式において、八戸波の場合に応答が最も大きくなっている。

横圧に対する軌道側の耐力70～100kNと比較して、新幹線の場合、鋼製ブレース・ダンパーを用いない新形式鉄道高架橋（Case2）、従来型のラーメン高架橋（Case3）でやや基準値を上回る結果となった。通勤電車では、全ての地震波において基準値内に収まっている。

制限値は、個々の締結装置の耐力であり、軌道構造全体では更に余裕があることを考慮すると、今回の検討範囲においては、軌道側の耐力が走行安全性の支配的要因とはならないと言ってよいであろう。

(2) 飛び上がり脱線

図-13に飛び上がり脱線（上心ロール）の評価指標である脱線係数Q/Pを示す。図-14に、式(6)に照らし、波形上のピーク個々の半波長周期からQ/P限度値を求め、これを用いて基準化を行った安全率を示す。

図から新幹線では、エルセントロ波、神戸波などの地震波で鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋に

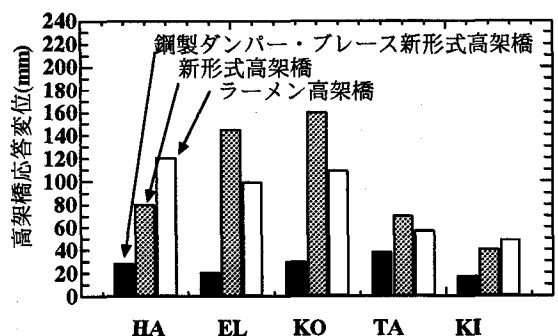


図-11 高架橋レールレベル応答変位

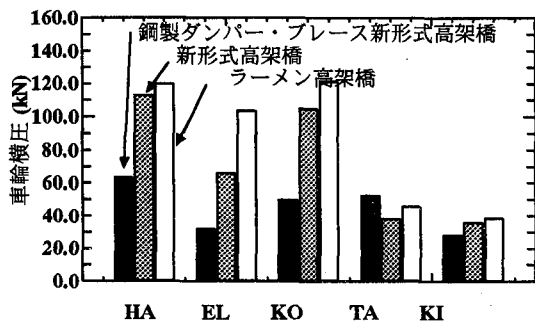


図-12(a) 車輪横圧 (新幹線)

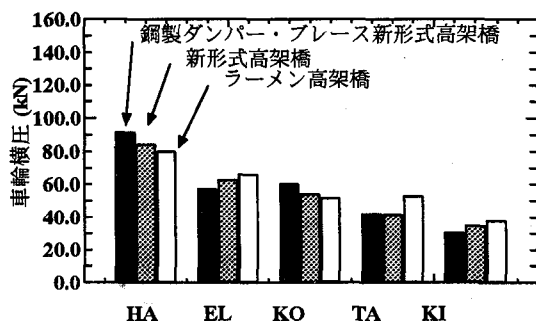


図-12(b) 車輪横圧 (通勤電車)

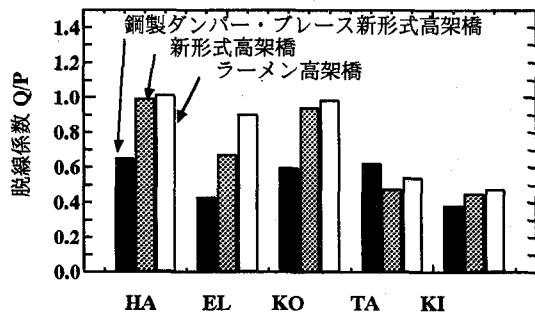


図-13(a) 脱線係数 Q/P (新幹線)

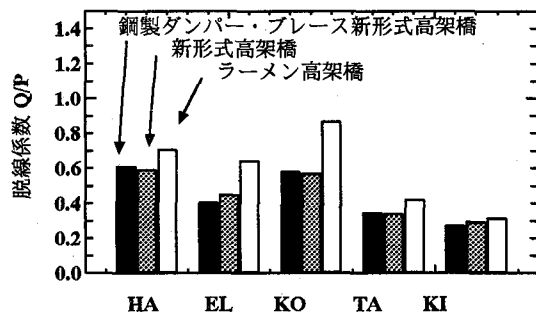


図-13(b) 脱線係数 Q/P (通勤電車)

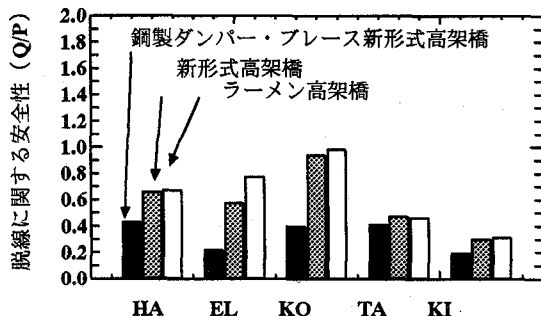


図-14(a) 飛び上がり脱線に関する安全性 (新幹線)

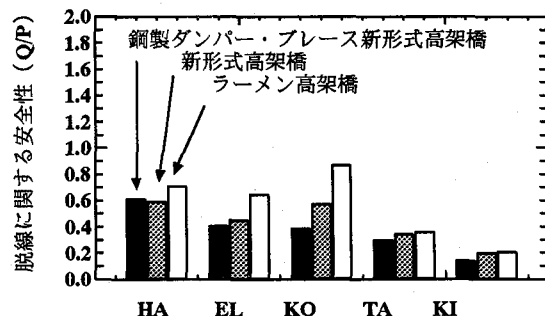


図-14(b) 飛び上がり脱線に関する安全性 (通勤電車)

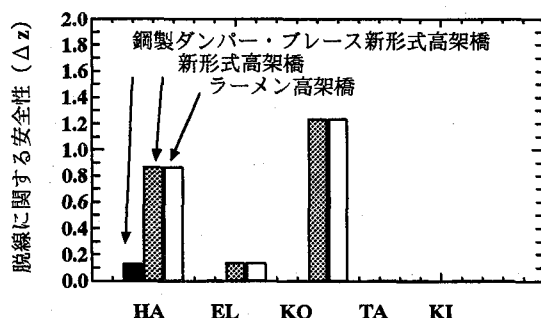


図-15(a) 足上げ脱線に関する安全性 (新幹線)

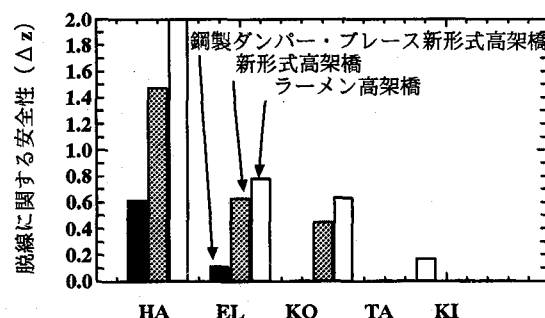


図-15(b) 足上げ脱線に関する安全性 (通勤電車)

において走行性改善効果が大きいことが分かる。タフト波、新菊川波など短周期の地震波では、改善効果が小さいが、これらの周期の地震波は図からも明らかなように、それほど列車走行性に影響を及ぼさない。

通勤電車では、神戸波で鋼製ダンパー・ブレースを用いた新形式高架橋において走行性改善効果が大きい、

他の波に対しては効果が少ないことが分かる。

飛び上がり脱線に関する安全性は、いずれの場合も基準値以下に収まっており、このモードの脱線形態は走行性に関する支配的要因にはならないことが分かる。

(3) 足上げ脱線

図-15に足上げ脱線 (下心ロール：ロッキング振動)

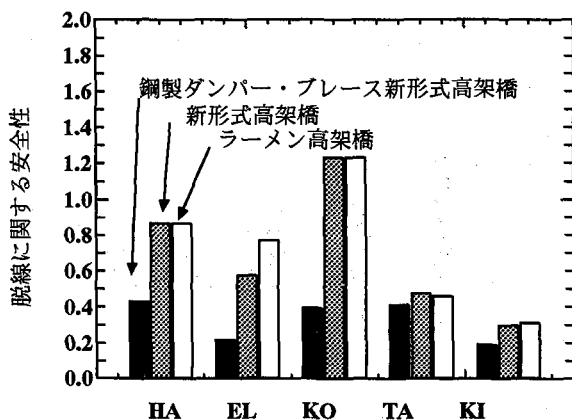


図-16(a) 列車走行性の総合評価 (新幹線)

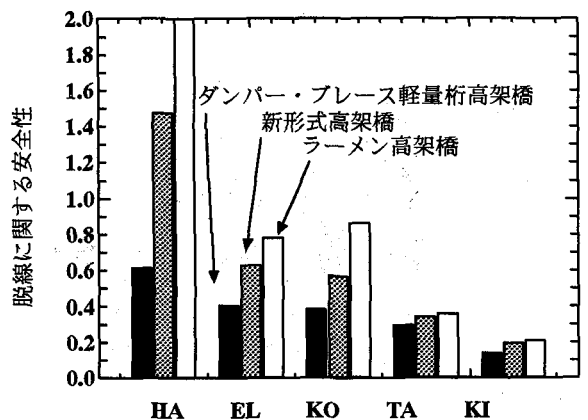


図-16(b) 列車走行性の総合評価 (通勤電車)

の評価指標である車輪浮き上がり量に対する安全係数を示す。これは、車輪のレールからの浮き上がり量を、車輪が有するフランジ高さ30mmで除した値である。

新幹線では、八戸及び神戸波で応答が卓越しており、鋼製ダンパー・ブレスを用いた新形式高架橋では走行性の改善効果が著しいことが分かる。

通勤電車では八戸波及びエルセントロ波で応答が卓越しており、同様に鋼製ダンパー・ブレスを用いた新形式高架橋では走行性の改善効果が著しいことが分かる。

基準値と比較して、新幹線では神戸波で基準値を上回る。最も顕著な応答は通勤電車における八戸波であり、全ての解析ケースを通じてこの場合が最も応答が大きなものとなった。

(4)総合評価

図-16に走行性に関する総合評価を示す。これは飛び上がり脱線に関する図-14と足上げ脱線に関する図-15を重ねて示したものである。鋼製ダンパー・ブレスを用いた新形式高架橋では、新幹線、通勤電車ともに、八戸、エルセントロ、神戸波において、走行性の改善効果が顕著である。タフト、新菊川波においては、改善効果は見られないが、両波とも列車の走行安全性を阻害するレベルには無い。

以上から、今回の検討範囲においては、鋼製ダンパー・ブレスを用いた新形式高架橋は、在来型のラーメン高架橋に比べ、列車の走行安全性の点で非常に優れていると結論できる。

5. まとめ

鋼製ダンパー・ブレスを用いた新形式鉄道高架橋について、限られた条件であるが、その列車の走行性を定量的に評価した。本研究で得られた成果は以下の通り。

- ①レールレベルの最大応答変位発生時刻とQ/P及び車輪足上げ量最大値の発生時刻はほぼ一致する。
- ②構造物の高剛性化によりQ/Pの振動周期は短くなる。これにより制限値は緩和される方へシフトする。

③鋼製ダンパー・ブレスを有する新形式高架橋は、高降伏震度のため、応答加速度は高まるが、変位抑制効果が非常に大きい。

④高架橋上の列車走行性は、足上げ脱線（上心ロール：ロッキング振動）に支配される。また、長周期（卓越周期1.0秒以上）、中周期（卓越周期0.5～1.0秒）の地震波の影響を受けやすい。

⑤鋼ダンパー・ブレスを用いた新形式高架橋は、列車走行性を大幅に改善することができる。

今後は、本構造形式における、地盤、基礎構造、地震規模、動的相互作用等の影響について明らかにしていく所存である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告特別4号，1996.4
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道施設の耐震基準に関する調査報告書，1996.3
- 3) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動シミュレーション（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），日本機械学会論文集（C編），64巻，626号，1998-10
- 4) 石橋忠良，吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究，土木学会論文集，第390号/V-8，pp.57-66，1988.2
- 5) 高橋泰彦，品部祐児：せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第494号，pp.107-114，1997.4
- 6) 松本信之，岡野素之，在田浩之，他：鋼製ダンパー・ブレスを有するRC鉄道高架橋の耐震性能，構造工学論文集，Vol.45.A，1999.3
- 7) 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
- 8) 松浦章夫，富田健司，涌井一：鉛直フランジ付き3次元車両モデルによる振動軌道上車両の走行性に関する研究，土木学会論文集，No.556/I-38，pp.169-178，1997.1

(1999年9月17日受付)