

論文 ブレース補強による鉄道高架橋の列車走行性に関する研究

吉田 幸司^{*1}・関 雅樹^{*2}・曾我部 正道^{*3}

要旨：既存鉄道高架橋の耐震補強では、耐力や変形性能の向上だけでなく、列車走行性の向上も視野に入れた構造物の強化が必要であると考えられる。本研究では、既存高架橋の耐震補強工法の一つとして実用化しているブレース補強に着目し、実大の鉄道高架橋試験体を用いた振動試験、列車と構造物の動的相互作用解析を実施し、ブレース補強による高架橋全体の剛性や制振効果の向上、列車走行性の向上を示した。

キーワード：鉄道高架橋、ブレース補強、列車走行性、変位制限、固有振動数

1. はじめに

既存鉄道高架橋の耐震補強では、耐力や変形性能の向上だけでなく、リスクミニマイズに向け、列車走行性の向上も視野に入れた構造物の強化が必要であると考えられる。列車走行性の向上に関する地震対策の基本は、構造物を崩壊させないこれまでの耐震補強を推進することが大前提である。これに加え、地震時の構造物の変位を制限することが列車走行性の向上には有効であり、2006 年制定の変位制限標準¹⁾には、少なくとも L1 レベルの地震動に対して列車走行安全性を確保するための変位制限等が規定されている。また、構造物の応答変位を制限する有効な手段としては、鋼製ダンパー・ブレース等による構造物変位を可能な限り抑制する手法が注目を集めている。

そこで、本研究では、既存高架橋の耐震補強工法の一つとして実用化している X 型鋼製ダンパー・ブレース補強(以下、「ブレース補強」)^{2),3),4)}に着目し(図-1 参照)、実大の鉄道高架橋試験体を用いた振動試験による高架橋全体の剛性や制振効果などの振動特性へのブレース補強の影響検討、ならびに列車と構造物の動的相互作用解析により列車走行性へ関連する応答変位や目違いなどへの影響について検討する。

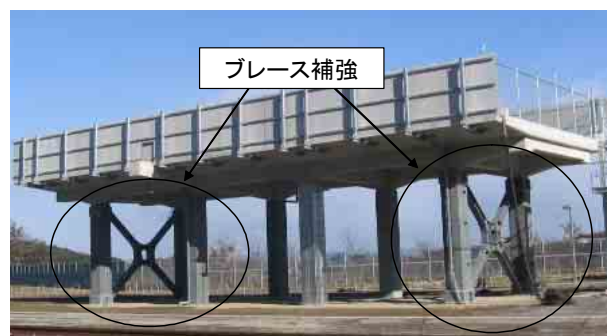


図-1 ブレース補強した高架橋

2. ブレース補強による振動特性への影響

2.1 自由振動試験による実験検討

(1) 試験体概要

ブレース補強の適用による既存高架橋の振動特性への影響を検討するには固有値解析や模型実験等が考えられるが、解析条件や模型の寸法効果の影響を排するため、実大サイズの高架橋を再構築し、同高架橋を用いた自由振動試験を実施した。再構築した試験高架橋は、東海道新幹線の標準的 RC ラーメン高架橋を再現した高架橋(2005 年竣工)で、独立した直接基礎の 1 層 2 柱式 3 径間ラーメン高架橋(橋長 24m: スパン 3m+6m@3+3m, 高さ 7.5m, 柱寸法 0.6m×0.6m,)である(図-1 参照)。また、全柱部材を鋼板巻き補強(鋼板厚 $t=6\text{mm}$, 隙間 30mm モルタル充填)し、両端の直角方向ラーメンにブレ

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 主幹研究員 博(工) (正会員)

*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 次長 博(工) (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学 主任研究員 博(工) (正会員)

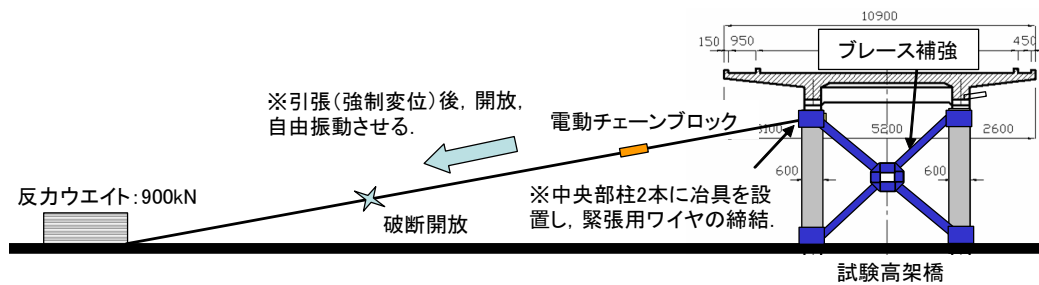


図-2 高架橋ブレース補強および自由振動試験の概要

ブレース補強する。ブレース補強は、X 型のブレース（H-250）とブレース中央部にせん断降伏パネルを有するダンパー部からなり、補強後の降伏変位を 10mm 程度となるよう設計した図-4 に示す荷重－変位関係を有する。なお、補強設計では、ブレースをトラス要素でモデル化し、RC フレーム部は耐震標準⁵⁾による。実験ケースは、柱に鋼板巻き補強のみ施工したブレース補強のない状態「補強なし」とブレース補強した状態「ブレース補強」の 2 ケースである。

(2) 試験手順および概要

自由振動試験の手順は、高架橋の中央部の 2 柱の上部位置で治具を介してワイヤーにて反力ウエイト（約 900kN）と緊結。電動チェーンブロック（200kN×2 台）で橋軸直角方向へ引張り、強制変位させた後、破断開放し自由振動させる手法とした（図-2 参照）。載荷は、各ケース同一の目標引張荷重とし、補強なしでの柱部材のひび割れ荷重程度となる約 200kN として、複数回実施した。計測は、振動計（速度計）と変位計を柱上下端部およびスラブ上に配置し、同時計測を実施した（図-3 参照）。

2.2 実験結果と考察

自由振動試験の結果として、時刻歴波形（応答速度波形）を図-5 に示す。ここで、自由振動の引張荷重は、補強なしでは 168kN、ブレース補強ありでは 175kN での結果である。両者は、概ね同レベルの荷重値と判断して、速度計で測定した速度波形を直接比較した。図-5(a) には、補強なしの基礎（R1）と柱上部（R3）の速度波形の比較を、図-5(b) には、ブレース補強の基礎と柱上部の速度波形比較をそれぞれ示す。両図ともに柱上部の振幅が大きく、上部工である高

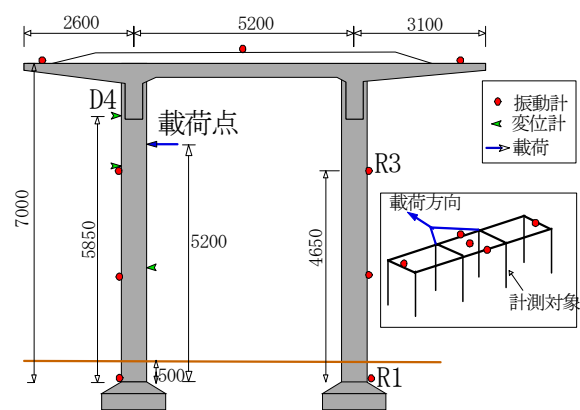


図-3 計測位置概要

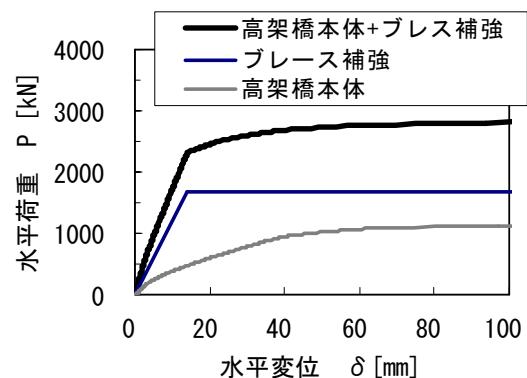
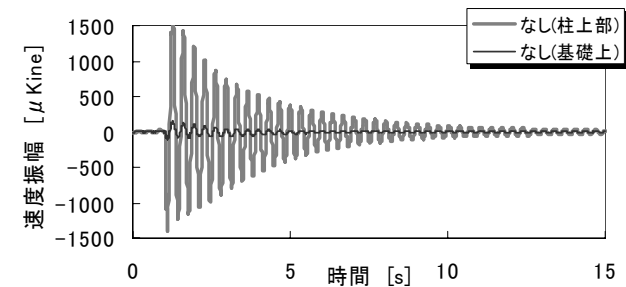


図-4 荷重－変位関係（Pushover 解析結果）

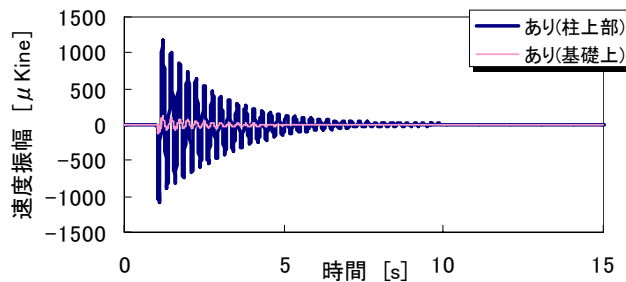
架橋本体の振動が卓越していることが確認できる。また、柱上部と基礎上の位相は補強なしの場合もブレース補強の場合も一致する。

次に、ブレース補強有無について比較する。図-5(c) には振動が卓越する柱上部（R3）でのブレース補強有無の速度波形比較、図-5(d) には、図-5(c) の拡大図（時間 1～4 秒間）をそれぞれ示す。図-5(c), (d) から、ブレース補強の方が速度振幅は小さく、また周期の短い振動波形を呈していることが分かる。

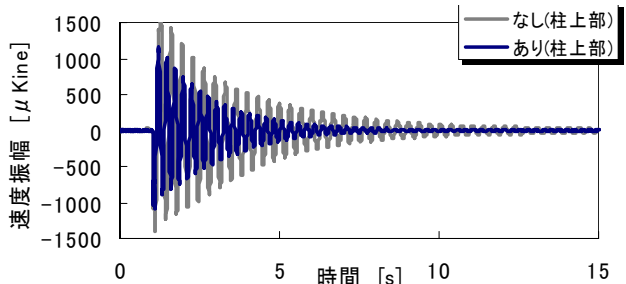
一方、図-5 の時刻歴波形より、対数減衰率を読み取り、その値を比較すると、補強なしでは 1.6% に対し、ブレース補強では 2.2% であり、変形量



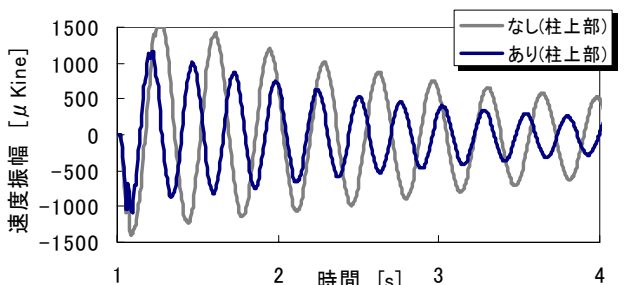
(a) 補強なし：柱上部と基礎上の比較



(b) ブレース補強：柱上部と基礎上の比較



(c) ブレース補強有無の比較（柱上部）



(d) ブレース補強有無の比較（柱上部）【拡大】

図-5 自由振動試験結果

の小さい低ひずみ領域においても減衰特性の向上による制振効果を確認した。減衰率の上昇は、ブレース補強による部材追加による構造減衰の増加や上部工の剛性向上に伴う地盤との相互作用による逸散減衰の増加などが考えられる。

次に、周波数領域にてブレース補強有無を比較する。図-6に各ケースでのフーリエスペクトルを示す。各ケースの固有振動数は、補強なしでは2.98Hz、ブレース補強では3.90Hzであり、ブレース補強により、約1.3倍の振動数の上昇が確認できる。また、柱上部と基礎上ともに同じ固

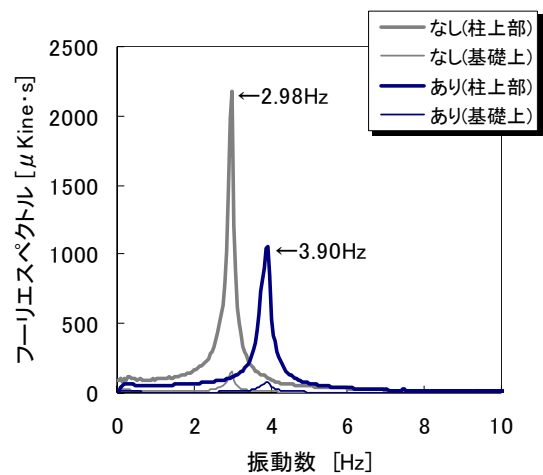


図-6 固有振動数と振幅の比較

有振動数が確認でき、この固有振動数が地盤との相互作用を含む高架橋全体の振動モードの値であると考えられる。ここで、固有振動数が剛性の0.5乗に比例すると仮定した場合、ブレース補強により高架橋全体の剛性は約1.7倍（約1.3倍の2乗）に増加していることになる。また、スペクトル振幅も半分程度になっており、ブレース補強による制振効果も確認できる。さらに、基礎上でのスペクトル振幅にも差異が見られ、上部工だけでなく基礎を含めた高架橋全体系での挙動に効果が現れている。

3. 列車と構造物の動的相互作用解析

3.1 解析手法

列車と鉄道構造物の動的相互作用解析：Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structures (DIASTARS II)^{6,7)}により、列車走行性に関連する応答変位や目違いなどへのブレース補強による影響を検討する。

(1) 車両モデル

車両の力学モデルを図-7に示す。車両モデルは、車体・台車・輪軸を剛体質点と仮定し、これらをばね・ダンパーで結合し構成する1両31自由度モデル^{6,7)}の8両編成である。車体は重心位置で水平 (y)、鉛直 (z)、ローリング (ϕ)、ピッチング (θ)、ヨーイング (ψ) の5自由度、台車も5自由度（添え字 t ）、輪軸はピッチングを除く4自由度（添え字 w ）を持つ。また、車

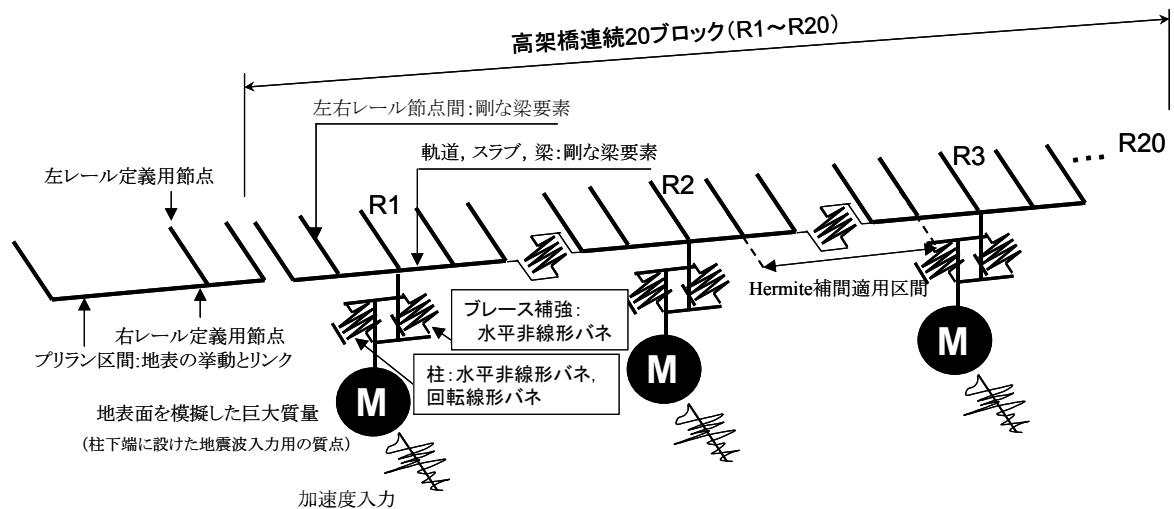


図-8 RC 鉄道高架橋の解析モデル概念図

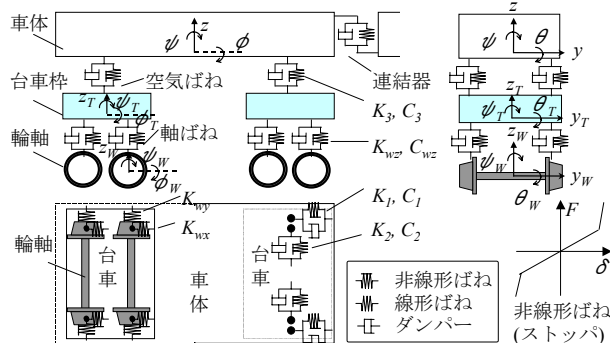


図-7 車両モデル

両長 25m, 軸重 110kN となる車両を仮定しモデル化した。列車速度は $V=270\text{km/h}$ である。

(2) 構造物モデル

標準的な RC ラーメン高架橋を基本として、高架橋高さ等が変化する連続 20 ブロック (R1, R2, R3, ..., R20) の高架橋 (柱部材は鋼板巻き補強) を想定してモデル化した。解析モデルの概念図を図-8 に示す。構造物は有限要素でモデル化し、スラブ・上層梁は剛な梁要素、柱は静的非線形解析結果を反映したトリリニアの水平非線形ばね要素と回転線形ばね要素とした。また、ブレース補強は柱のばねに並列してバイリニアの水平非線形ばね要素にモデル化した。柱下端には地震動入力用の質点 (地表面を模擬した巨大質量) を設けた。対象区間前にはプリラン区間を設けている。各高架橋を高さ等に応じて、図-9 に示すような橋軸直角方向の平面モデルにモデル化し、静的非線形解析により、表-1 に示す解析諸元に設定した。なお、各部材は耐震標準⁵⁾およ

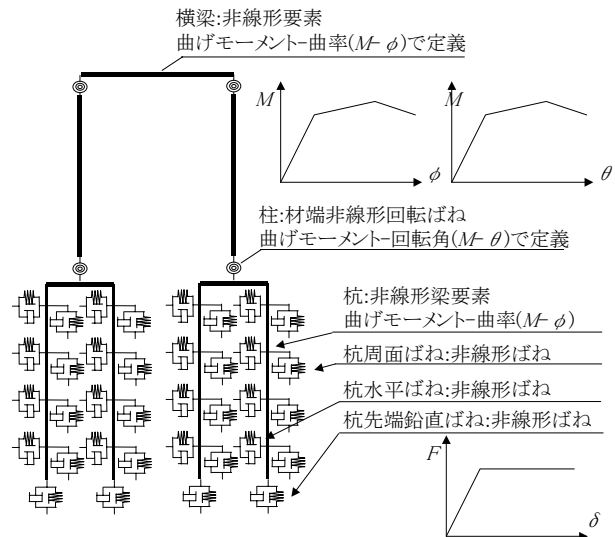


図-9 静的非線形解析モデルの概念図

表-1 高架橋の解析諸元

項目		設定値
高架橋高さ		5～8m, 0.5m間隔
等価固有周期		0.54～0.85sec
降伏震度	補強なし	0.38～0.52
	ブレース補強	0.94～1.07

びコンクリート標準⁸⁾に従いモデル化し、地盤ばねは、耐震標準⁵⁾および基礎標準⁹⁾に従い、非線形ばねによりモデル化した。ここで地盤抵抗係数は $\alpha_f=1.0$ とした。

また、高架橋ブロック間には角折れや目違いといった不同変位が生じる。この構造物間の不同変位に対するレールの緩衝効果を考慮するため、Hermite 補間により軌道の変形形状を求める手法¹⁾を用いている。

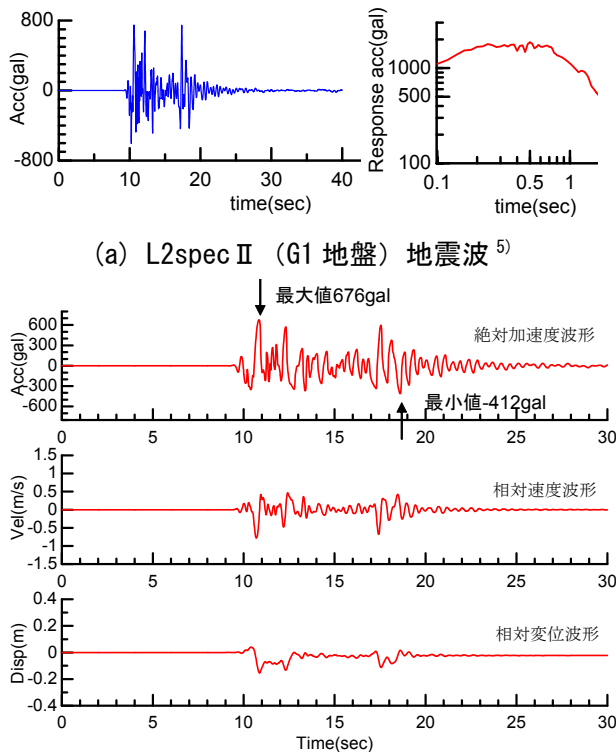


図-10 入力地震動

表-2 解析条件

解析条件	設定値
列車走行開始位置	高架橋開始点から, -400m, -200m, 0m, 200m, 400m, 600m, 800m, 1000m
入力地震動	L2spec II の地表面応答波形 加速度振幅を4段階に調整 ・補強なし: 0.25~0.40 倍 ・ブレース補強: 0.40~1.0 倍

(3) 車輪とレール間の力学モデル

車輪を一定勾配の円錐踏面と鉛直フランジにてモデル化し、鉛直方向には *Hertz* の接触ばねを、水平方向には線形クリープ則とレール小返りばねを用いて、車輪とレール間の相互作用力を算出する^{6),7)}。

(4) 数値解析法と入力地震動

車両および構造物の運動方程式をモーダル変換し、得られる車両および構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、直接積分法 (Newmark の平均加速度法) により時間増分 Δt 単位に解く。ただし、運動方程式が非線形であることから、時間増分 Δt 単位に、 Δt 内での不釣合力が十分小さくなるまで反復計算を行っている。

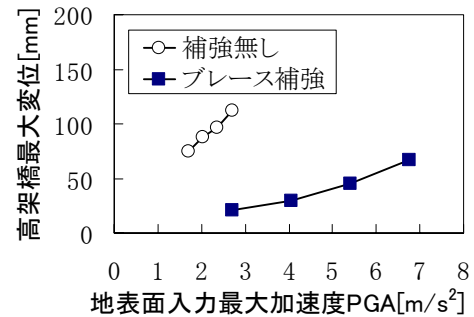


図-11 高架橋天端最大水平変位の比較

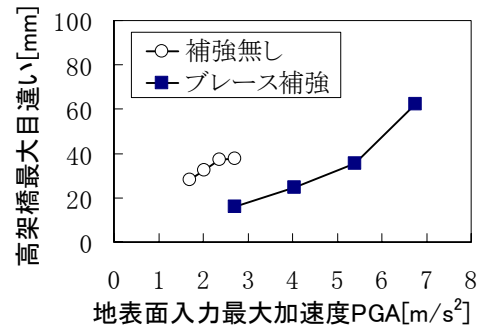


図-12 高架橋天端最大水平目違いの比較

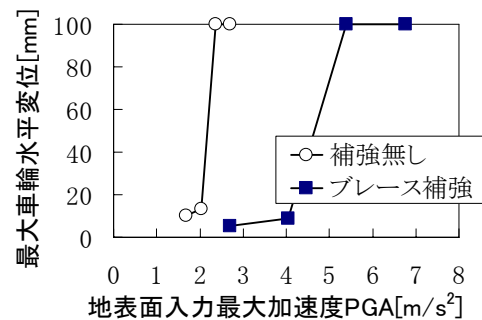


図-13 車輪最大水平変位の比較

入力地震動は、図-10(a)に示す L2 スペクトル II (G1 地盤)⁵⁾を、想定した高架橋区間 (G3 地盤相当) の耐震設計上の基盤面に入れ、地盤応答解析により地表面応答波形を算出 (図-10(b) 参照)。この地震動を表-2に示すように4段階に加速度振幅を調整 (最大車輪水平変位が 100mm を超える振幅程度を上限に、補強なし: 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 倍, ブレース補強: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 倍。) し、地表面を模擬した質点に入力した。また、地震動入力のタイミングとして、列車走行開始位置も 8 パターン実施した。

3.2 解析結果と考察

動的相互作用解析の結果として、地表面入力最大加速度に対する高架橋天端の最大水平変位を図-11に、最大水平目違いを図-12に、車輪の

最大水平変位を図-13 に各々ブレース補強有無で示す。なお、各図の値は、地震動入力の変位変えた 8 つの走行パターンでの高架橋および列車の応答結果の内、最も厳しいパターンの結果を最大値として示しており、列車走行性からは安全側の評価結果である。

高架橋の最大応答変位に対するブレース補強の影響として、図-11 の同一地表面加速度 ($PGA=2.70m/s^2$: 加速度振幅 0.40 倍) を比較する。ブレース補強により最大応答変位が 111.8mm から 20.6mm へ抑制されている。また、ブレース補強ではより高い加速度振幅においても応答変位を抑制しており、 $PGA=6.76m/s^2$ (加速度振幅 1.0 倍) での最大応答変位が 66.6mm と、補強なしでの振幅 0.25 倍での最大応答変位 (75.1mm) よりも小さい。また、図-12 の高架橋最大水平目違いに対するブレース補強の影響も顕著である。同一地表面加速度 ($PGA=2.70m/s^2$) における最大水平目違いでは、ブレース補強により 37.8mm から 6.5mm へ抑制されている。車輪の最大水平変位においてもブレース補強による効果が現れている (図-13 参照)。

ブレース補強により最大応答変位ならびに最大水平目違いの抑制効果が確認でき、ブレース補強による列車走行性の向上を示した。

5. まとめ

ブレース補強による鉄道高架橋の列車走行性に関する実験解析検討より、以下の知見を得た。

- (1) ブレース補強により、高架橋全体の固有振動数の高振動数化、すなわち高剛性化を確認し、高架橋の振動特性の改善効果を実験的に検証でき、かつ定量的に把握した。
- (2) 剛性、減衰性向上といった耐震性能向上に寄与する制振効果は、上部構造物のみならず基礎を含めた高架橋全体系での挙動に現れていることを確認した。
- (3) ブレース補強により地震時の最大応答変位ならびに隣接高架橋間の最大水平目違いの抑制効果が確認でき、ブレース補強による列

車走行性の向上を示した。

今後は、桁式高架橋など他の構造形式を含む高架橋区間での検討や他の地震動入力など、検討ケースを積み重ね深度化していく所存である。

謝辞

自由振動試験の実施には、株式会社大林組技術研究所の松田隆博士、菊地敏男博士にご協力を賜り、ここに記して謝意を表します。

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 (変位制限)，丸善，2006.2.
- 2) 吉田幸司，喜多直之，岡野素之，関雅樹：圧縮型鋼製ダンパー・ブレースによる RC ラーメン高架橋の耐震補強工法，土木学会構造工学論文集 Vol.50A, pp.551-558, 2004.3.
- 3) Yoshida,K., Kita,N., Okano,M., Seki,M. : Shaking Table Tests on Seismic Performance of Railway Bridges with Compression Type Braces, *Proc. 1st Int. Conf. on Advances in Experimental Structural Engineering*, pp. 481-488, 2005.
- 4) 島田賀浩，梅田博志，吉田幸司，長縄卓夫：圧縮型鋼製ダンパー・ブレース工法を用いた RC ラーメン高架橋耐震補強の施工，日本鉄道施設協会誌 2005 年 11 号, pp.46-48, 2005.11.
- 5) 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)，1999.10.
- 6) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路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，No.513/I-31, pp.129-138, 1995.
- 7) 松本信之，曾我部正道，涌井一，田辺誠：構造物上の車両の地震時走行性に関する検討，鉄道総研報告，Vol.17, No.9, 2003.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)，2004.4.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物・抗土圧構造物)，1997.3.