

論文 目違い防止対策等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・阿知波 秀彦*2・関 雅樹*3・曾我部 正道*4

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強化が必要である。地震時の列車走行性には構造物の横方向の振動変位、構造物境界における不同変位が影響することから、これらを抑制することが肝要である。本研究では、高架橋の目違い防止対策等の変位制限対策について、列車と構造物をモデル化した動的解析等を実施し、変位制限対策による地震時の列車走行性の向上を示した。

キーワード：鉄道高架橋、列車走行性、変位制限、動的解析

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、既存鉄道高架橋のせん断耐力や変形性能の向上を目的とした耐震補強を実施してきた。一方、新潟県中越地震での事象を鑑み、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大前提は、構造物を崩壊させない耐震補強の推進である。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る。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、「地震時の走行性には構造物の横方向の振動変位および構造物境界における不同変位が影響する」とあり、これらを抑制することが肝要である。

これまで著者らは、構造物の振動変位を制限する手段として、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図-1に示す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、地震時の高架橋の橋軸直角方向の振動変位の抑制効果について検討⁵⁾してきた。一方、旧国鉄では東海地震対策の一環として、隣接高架橋間の不同変位(水平目違い)の抑制について検討し、PC鋼棒による隣接高架橋端部の連結拘束する対策⁶⁾(以下、「目違い防止工」)を一部高架橋において施工している(図-2参照)。

本研究では、鉄道高架橋を対象に、構造物境界の不同変位を抑制する「目違い防止工」と、構造物の横方向の振動変位を抑制する「ブレース補強」の二つの変位制限対策に着目し、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地震時の応答変位や目違いなどへの影響について検討する。

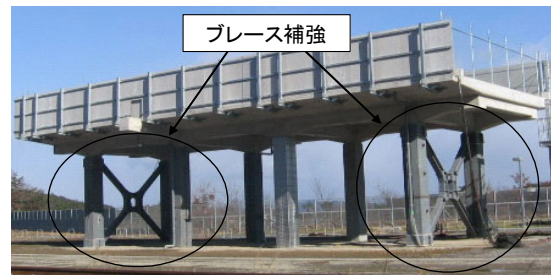


図-1 ブレース補強した高架橋

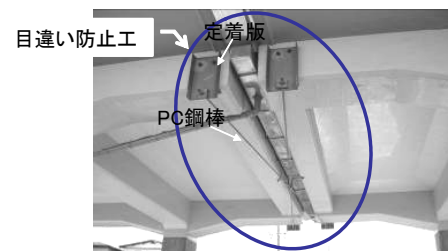


図-2 目違い防止工の概要

2. 変位制限対策の概要

2.1 振動変位対策(ブレース補強)の概要

ブレース補強は、鉄道RCラーメン高架橋の橋軸直角方向の振動変位を抑制するために、両端の直角方向ラーメンに図-1に示すように設置する。ブレース補強は、X型のブレース(H断面)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る。

ブレース補強の諸元としては、補強後の降伏耐力(高架橋本体+ブレース補強)が補強前(高架橋本体のみ)の概ね2倍程度になるように補強設計している。図-3に標準的な鉄道高架橋(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)について補強設計した荷重-変位関係を例示する。補強設計では、ブレースをトラス要素でモデル化し、

*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 主幹研究員 工修(正会員)

*3 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 部長 博(工)(正会員)

*4 (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)

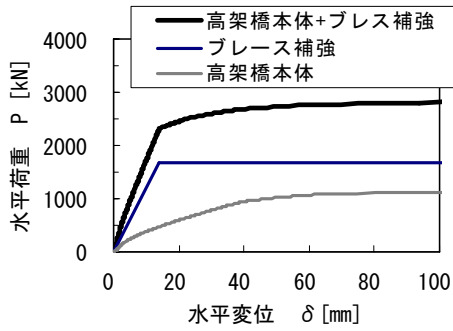


図-3 荷重-変位関係 (標準的な高架橋の補強設計例)

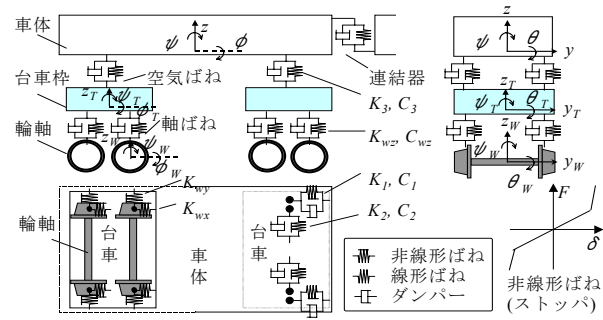


図-4 車両モデル

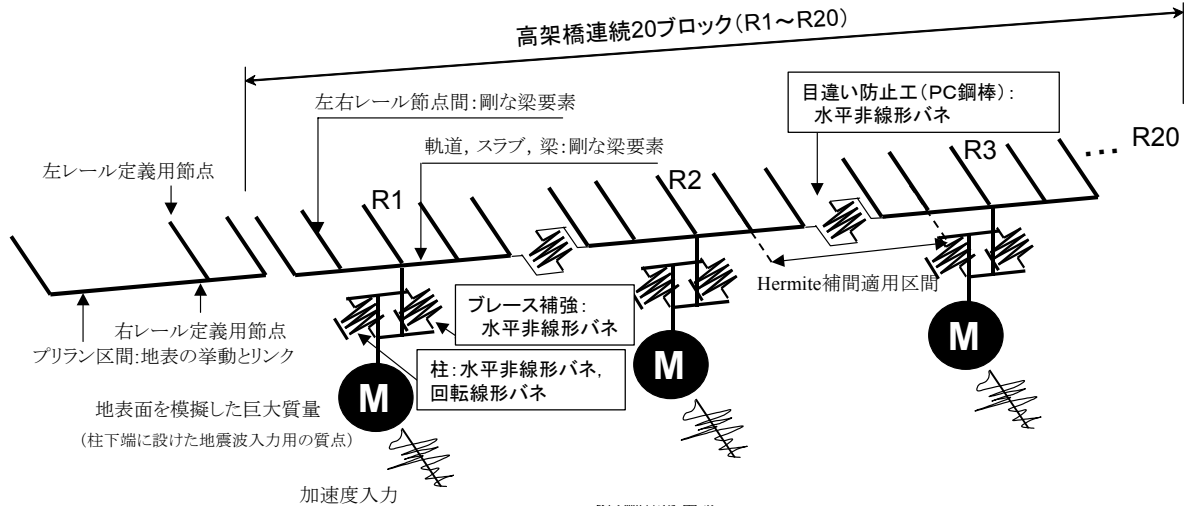


図-5 RC 鉄道高架橋の解析モデル概念図

RC フレーム部は耐震標準⁷⁾による。

また、本研究においては、高架橋の柱部材は鋼板巻き補強 (鋼板厚 $t=6\text{mm}$ 、隙間 30mm モルタル充填) した状態を想定した。

2.2 不同変位対策 (目違い防止工) の概要

目違い防止工は、隣接高架橋間の不同変位 (水平目違い) を抑制するために、図-2 に示すように PC 鋼棒で隣接する高架橋端部を X 字状に連結する対策である。

目違い防止工 (PC 鋼棒) の諸元としては、旧国鉄での検討による仕様⁶⁾では、PC 鋼棒への最大作用力を 150kN 程度以下とし、鋼棒径 $\phi 17\text{mm}$ 、長さ $l=5.8\text{m}$ 、降伏荷重 $F_{py}=213\text{kN}$ 、引張荷重 $F_{pu}=245\text{kN}$ 以上、初期剛性 $K=EA/l=7755\text{kN/m}$ である。

なお、本研究においては、兵庫県南部地震以降の大規模地震を意識して、耐力的に 4 倍程度になる諸元についても想定した。

3. 列車走行性解析手法

3.1 解析手法の概要

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)^{8),9)}により、列車走行性に関する応答変位や目違いなどへの影響を検討する。

(1) 車両モデル

車両の力学モデルを図-4 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^{8),9)}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 w)、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 $V=270\text{km/h}$ を基本とした。

(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) の高架橋区間 (区間延長約 500m) を想定してモデル化した。解析モデルの概念図を図-5 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。各高架橋は高さ等に応じて、図-6 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⁷⁾およびコンクリート標準¹⁰⁾に従いモデル化し、地盤ばねは、耐震標準⁷⁾および基礎標準¹¹⁾に従い、図-7 に示

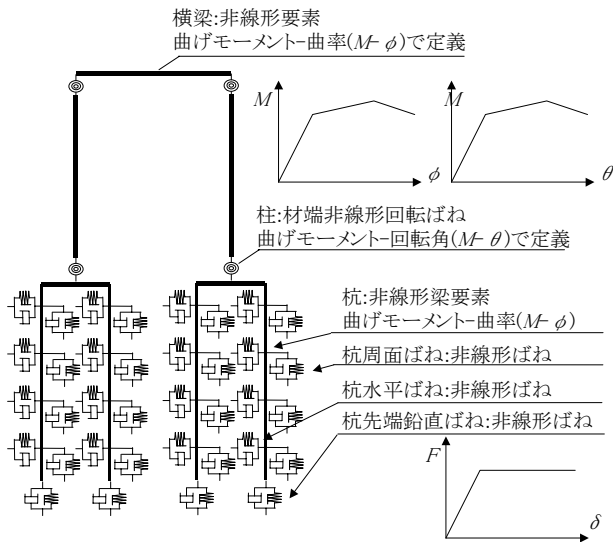
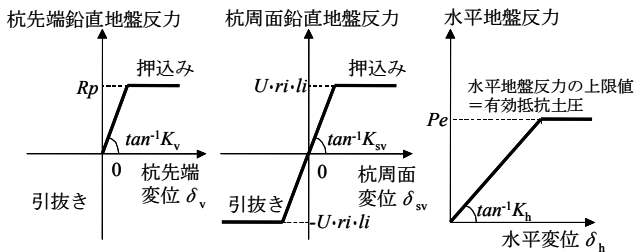


図-6 静的非線形解析モデルの概念図



(a) 杭先端の鉛直地盤抵抗特性 (b) 杭周面の鉛直地盤抵抗特性 (c) 杭の水平方向地盤抵抗特性

図-7 地盤のモデル化 (杭基礎)

す地盤抵抗特性の杭先端鉛直，杭周面鉛直，杭水平の非線形ばねにモデル化した。なお，地盤抵抗の上限値に考慮する地盤抵抗係数は $\alpha_f=1.0$ とした。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，対象区間前にはブリラン区間を設けた。

変位制限対策工については，ブレース補強は，高架橋各ブロックの直角方向2断面に設置（図-1参照）することとし，図-8に示す特性を有する集約したバイリニアの非線形ばねを柱のばねに並列して設定した。また，目違い防止工は，目違いが発生した場合に引張となる側のPC鋼棒のみを抵抗材として，図-9に示すバイリニアの水平非線形ばね要素を高架橋ブロック間に設定した。

また，高架橋ブロック境界に生じる構造物間の目違いや角折れといった不同変位に対するレールの緩衝効果を適切に考慮する必要がある。本検討では各時刻の車輪通過点での節点変位と平均折れ角から *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。また，適切な軌道の変形形状が再現されるように，高架橋端部に生じる目違いに対して，曲率の不連続を緩和するために高架橋の前後の区間にレール剛性を考慮した緩衝区間を前後それぞれ1m設けた。

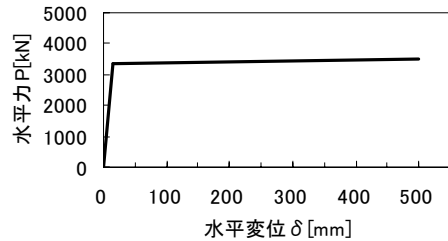
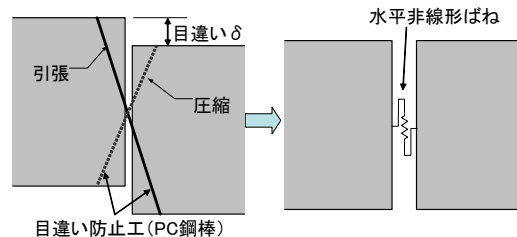
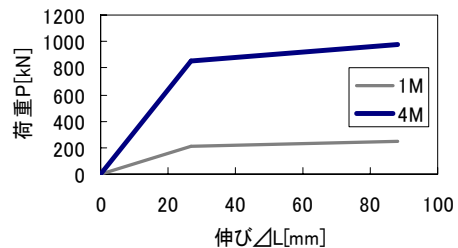


図-8 ブレース補強の荷重-変位関係 (2断面分)



(a) 目違い防止工のモデル化の考え方



(b) 目違い防止工の水平非線形ばね

図-9 目違い防止工のモデル化の概要

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	ブレースなし	0.51~0.77sec
	ブレース補強	0.32~0.37sec
降伏震度	ブレースなし	0.38~0.52
	ブレース補強	0.70~0.93

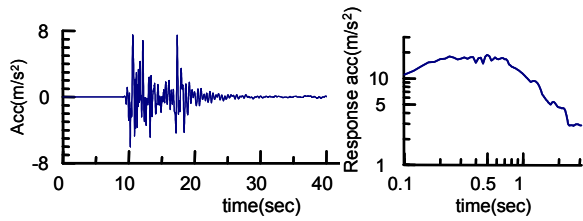
(3) 車輪とレール間の力学モデル

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^{8),9)}。

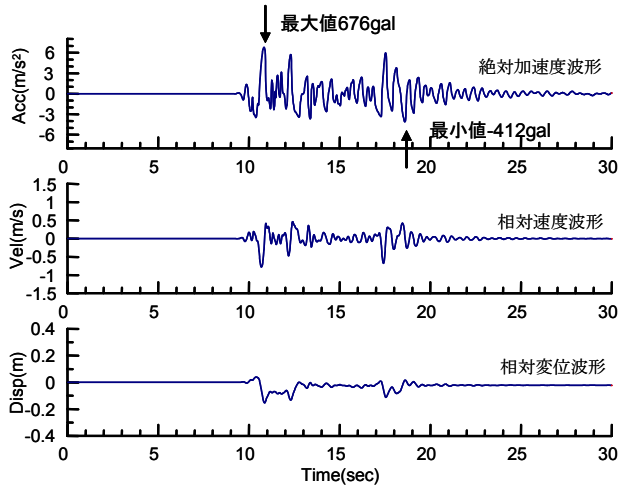
(4) 数値解析法と入力地震動

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。

入力地震動は，図-10(a)に示す L2 スペクトルII (G1地盤)⁷⁾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



(a) L2spec II (G1 地盤) 地震波⁷⁾



(b) 地表面応答波形 (L2spec II)

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 なお、加速度振幅を線形倍して入力 ・ブレース補強なし: 0.1~0.5 倍 ・ブレース補強あり: 0.4~0.8 倍

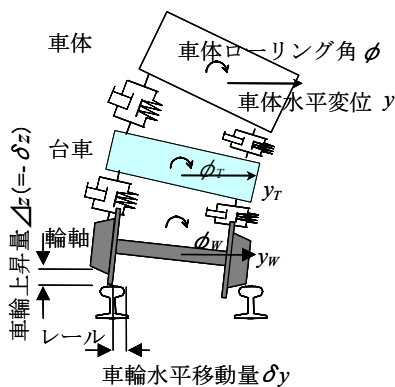


図-11 走行性評価方法に関する概念図

波形を算出 (図-10(b)参照)。この加速度波形を段階的に加速度振幅調整して、最大車輪水平移動量が 100mm を超える振幅程度を上限に線形倍 (ブレース補強のないケース 0.1~0.5 倍程度, ブレース補強のあるケース 0.4~0.8 倍) し、地表面を模擬した質点に入力した。

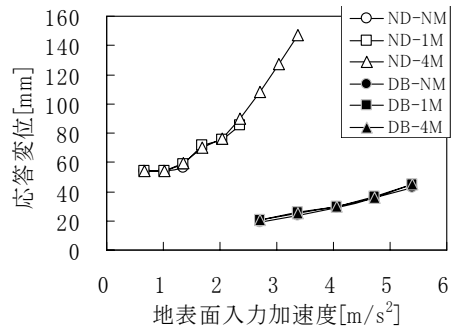


図-12 高架橋天端の最大応答変位の比較

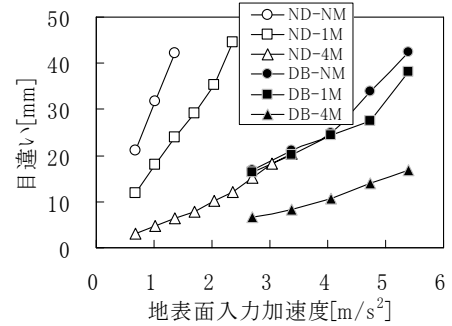


図-13 高架橋天端の最大水平目違いの比較

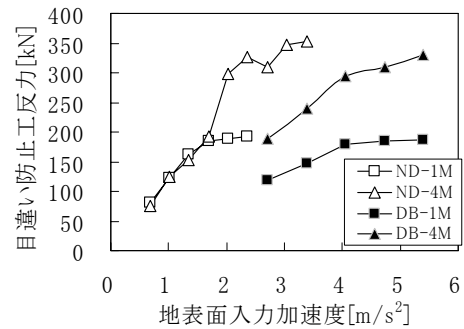


図-14 目違い防止工反力 (最大値) の比較

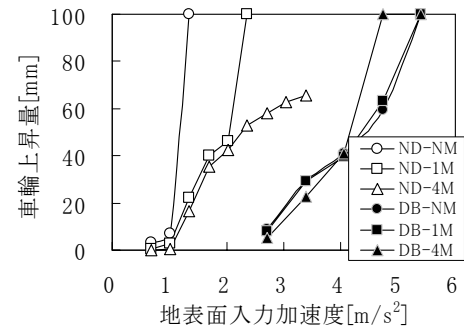


図-15 車輪上昇量の比較

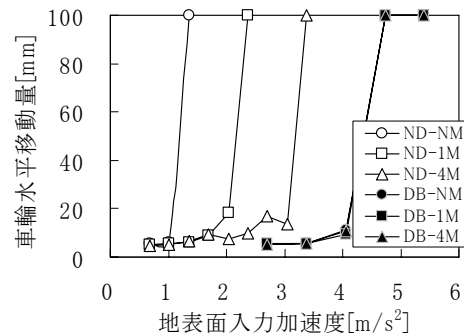


図-16 車輪水平移動量の比較

また、地震動入力タイミングとして、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

(1) 目違い防止対策等の効果

目違い防止工の有無および耐力、ブレース補強の有無の解析パラメータを組み合わせた6ケースの解析により、目違い防止対策等の効果を検討する。なお、この各ケースでの列車走行速度は基本の270km/hである。ここで、**図-11**に走行性評価方法に関する概念図を示す。図中に示す車輪とレールの相対変位の鉛直成分が車輪上昇量、水平変位が水平移動量である。走行性上の目安は、車輪上昇量30mm程度、車輪水平移動量70mm程度^りである。

動的解析の結果として、地表面入力最大加速度に対する高架橋天端の応答変位を**図-12**に、水平目違いを**図-13**に、目違い防止工反力を**図-14**に、車輪上昇量を**図-15**に、車輪水平移動量を**図-16**に各々示す。図の凡例は、目違い防止工なしは‘NM’、旧国鉄仕様は‘1M’、耐力4倍仕様は‘4M’、ブレース補強なしは‘ND’、ブレース補強ありは‘DB’である。また、各図の値は、地震動入力タイミングを変えた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対策工の効果について比較検討する(**図-12**参照)。目違い防止工に着目すると、ブレース有無にかかわらず応答変位はほぼ同じ値を示しており、応答変位の抑制にはほとんど寄与していない。一方、ブレース補強については、高い変位抑制効果が確認できる。

最大水平目違いに対する対策工の効果を比較検討する(**図-13**参照)。水平目違いについては、目違い防止工の効果がみられ、目違い防止工の耐力が高いほど目違いの抑制効果がより高い。一方、ブレース補強により高架橋の応答変位が抑制されるため、応答変位の絶対値が小さくなり、目違いの抑制にも寄与する。さらに、目違い防止工の耐力が高い仕様との組み合わせにより、より大きな目違いの抑制効果が得られる。**図-14**の目違い防止工反力から、旧国鉄仕様ではPC鋼棒が降伏するため、反力(抵抗力)がある加速度以上では発揮できなくなっている。目違い防止工の降伏耐力としては、少なくとも今回の高耐力仕様以上にするのがよいと考える。

次に、列車走行性評価として、車輪上昇量に対する対策工の効果(**図-15**参照)、車輪水平移動量に対する対策工の効果(**図-16**参照)を比較検討する。車輪上昇量に対しては、ブレース補強の効果が見られるが、目違い防止の効果はあまり大きくない。一方、車輪水平移動量に対しては、目違い防止工、ブレース補強による効果が確

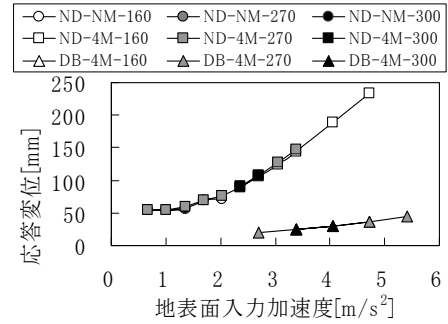


図-17 高架橋天端の最大応答変位の比較

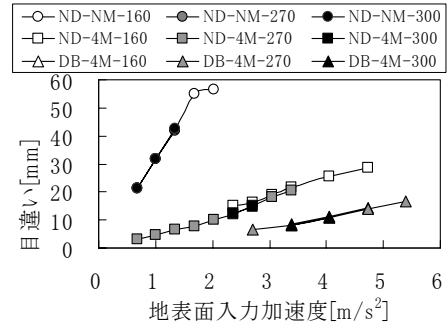


図-18 高架橋天端の最大水平目違いの比較

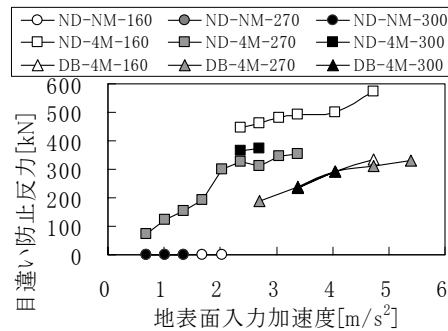


図-19 目違い防止工反力(最大値)の比較

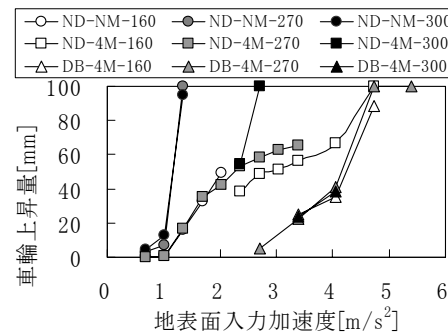


図-20 車輪上昇量の比較

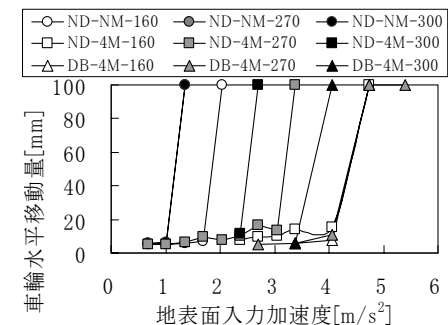


図-21 車輪水平移動量の比較

認できる。なお、組み合わせとして考えた場合、ブレース補強した場合には、目違い防止工の効果は小さい。目違い防止対策等により、高架橋の振動変位や不同変位を抑制でき、列車走行性を向上させることが確認できる。

(2) 列車速度の影響

基本の列車速度 270km/h に加え、低速 160km/h、高速 300km/h の計 3 パターンの列車速度により、列車速度の影響を検討する。

動的解析の結果として、地表面入力最大加速度に対する高架橋天端の応答変位を図-17 に、水平目違いを図-18 に、目違い防止工反力を図-19 に、車輪上昇量を図-20 に、車輪水平移動量を図-21 に各々示す。図の凡例は、列車速度 160km/h は '160'、270km/h は '270'、300km/h は '300' で、対策工の凡例は、前項と同じである。

まず、高架橋の応答変位（図-17 参照）、高架橋の水平目違い（図-18 参照）について、列車速度の影響を比較検討する。いずれの図においても、列車速度の差異の影響は見られないことから、今回検討した速度範囲においては、地震動による高架橋の応答への影響は極めて小さいといえる。また、目違い防止工反力についても、ブレース補強のない場合には若干差異が見られるが、列車速度の顕著な影響は見られない（図-19 参照）。

次に、列車走行性評価として、車輪上昇量に対する対策工の効果（図-20 参照）、車輪水平移動量に対する対策工の効果（図-21 参照）を比較検討する。その結果、車輪上昇量、車輪水平移動量には列車速度の影響が見られる。特に、車輪水平移動量において、高速なほど、同一水平変位となる地表面入力加速度が小さくなっており、速度に依存した傾向がある。

4. まとめ

鉄道高架橋の列車走行性に関する対策工の解析的検討より、以下の知見を得た。

- (1) 目違い防止工の設置により、水平目違いが抑制される。また、目違い防止工の耐力を上げることで、より高い目違いの抑制効果が得られる。一方、目違い防止工による最大応答変位の抑制効果は小さい。
- (2) ブレース補強により、最大応答変位が抑制され、高い変位抑制効果が得られる。また、応答変位の絶対値が小さくなり、目違いの抑制にも寄与する。さらに、目違い防止工の耐力が高い仕様との組み合わせにより、より大きな目違いの抑制効果が得られる。
- (3) 目違い防止工反力（抵抗力）が発揮されるよう、目違い防止工の降伏耐力を少なくとも今回の高耐力仕様以上にするのがよい。
- (4) 車輪水平移動量に対して、目違い防止工、ブレース補強による効果が確認できる。これらの対策工によ

り、高架橋の振動変位や不同変位を抑制し、列車走行性の向上が図れることを確認した。

- (5) 高架橋の応答変位、目違いともに、列車速度の差異の影響は見られず、今回検討した速度範囲においては、地震動による高架橋の応答への影響は極めて小さいといえる。
- (6) 車輪上昇量、車輪水平移動量には列車速度の影響が見られ、特に、車輪水平移動量において、高速なほど、同一水平変位となる地表面入力加速度が小さくなっており、速度に依存した傾向がある。

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) 喜多直之、吉田幸司、岡野素之、関雅樹：鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした圧縮型鋼製ダンパー・ブレース工法の実用化、土木学会論文集 F, Vol.63, No.3, pp.277-286, 2007.7.
- 5) 吉田幸司、関雅樹、曾我部正道：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、コンクリート工学年次論文報告集(CD-ROM), Vol.29, 3152, 2007.
- 6) 石橋忠良、古谷時春：新幹線の橋脚・橋台の耐震補強－鋼板巻き補強・ストラット等－、基礎工、pp.94-105, 1992.2.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.