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"!・阿知波 秀彦"2・関 雅樹"3・曽我部 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³⁾ 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「プレース補強」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



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

プレース補強は、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。プレース補強は、X 型のブレース(H断面)とプ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一変位関係を例示す 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-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^のによる。

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=6mm, 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^のでは、PC 鋼棒への最大作用力を 150kN 程度以下とし、鋼棒径 φ 17mm,長さ l=5.8m,降伏荷重 $F_{\rm nv}$ =213kN, 引張荷重 $F_{\rm nu}$ =245kN 以上, 初期剛性 K=EA/I=7755kN/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,列車走行性に関連す 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 (ϕ) の 5 自由度,台車も5 自由度(添え字_r),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=270km/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^のおよび基礎標準¹¹⁾に従い,図-7に示



図-6 静的非線形解析モデルの概念図



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α_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 象区間前にはプ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-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	プレースなし	0.51~0.77sec
	プレース補強	0.32~0.37sec
降伏震度	プレースなし	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)⁷⁷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

-921-



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。



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

(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¹⁾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 入力の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



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

- 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.
- 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.
- 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.
- 吉田幸司,関雅樹,曽我部正道: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.
- 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.
- 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.
- 2) 松本信之,曽我部正道,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.
- (基礎構造物・抗土圧構造物), 1997.3.