

3612 高架橋のダンパーブレース補強による東海道新幹線の 脱線・逸脱防止対策

正 [土] ○吉田 幸司 (東海旅客鉄道) フェロー [土] 松田 猛 (東海旅客鉄道)

正 [土] 阿知波 秀彦 (東海旅客鉄道) フェロー [土] 関 雅樹 (東海旅客鉄道)

Derailment and dislodgement prevention on Tokaido Shinkansen viaducts retrofitting with damping braces

Koji YOSHIDA, Central Japan Railway Company, 1545-33, Ohyama, Komaki City

Takeshi MATSUDA, Central Japan Railway Company

Hidehiko ACHIHA, Central Japan Railway Company

Masaki SEKI, Central Japan Railway Company

In the seismic retrofitting of the existing railway viaduct, not only the improvement of the strength and the ductility but also the improvement in safety of trains running on viaducts was necessary. In this research, to confirm the effect of limiting the response displacement of a viaduct by the brace reinforcement, the shaking table test using modeled viaduct specimens were executed. As a result, it was shown that the bridges reinforced with braces better running safety than those without, due to the seismic wave was controlled by the brace reinforcement.

Keywords: railway viaducts, displacement control, dynamic analysis, shaking table test, seismic retrofitting

1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震により、構造物に大きな損傷が無い場合であっても走行中の上越新幹線が脱線するという事象が発生した。この事象を受け、地震時の脱線防止と逸脱による被害拡大防止を目的として、実験、解析および試験敷設により各対策の機能確認等を実施し、その検討結果に基づき、地震時の脱線・逸脱防止に有効であり、保守上においても支障のない対策を確立した¹⁾。

一方、一連の脱線・逸脱防止対策の検討の中で、脱線防止ガードが有効に機能した地震動による水平変位は、実台車による加振実験で想定東海地震の1.0倍²⁾、1/5模型による加振実験で同1.4倍までの範囲であること³⁾に着目し、地震時の高架橋での変位増幅の抑制(高架橋変位対策)と、隣接高架橋間の水平目違いの抑制(高架橋目違い対策)について検討してきた。その結果、脱線防止ガードを有効に機能させるためには、従来から進めてきた東海道新幹線の地震対策に加え、地震時による大きな変位を抑制する軌道の強化と土木構造物の変位抑制の必要性を確認した⁴⁾。

本報告では、X型ブレース工法による高架橋変位対策と、PC鋼棒による高架橋目違い対策の二つの変位抑制対策に関して、補強仕様と解析、実験による機能確認の検討結果について述べる。

2. 高架橋の変位抑制対策の補強仕様

東海道新幹線の高架橋は、その多くが標準設計され、比較的柱断面が細いこと、橋軸方向の両端部が3mの張出し式構造、バラスト軌道などの特徴がある(図1)。特に、張出し式の構造は、東海道新幹線の高架橋に特徴的

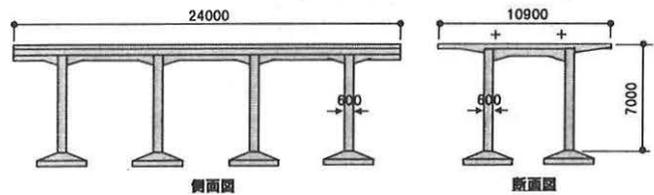


図1 東海道新幹線の標準設計高架橋の例



図2 高架橋変位対策

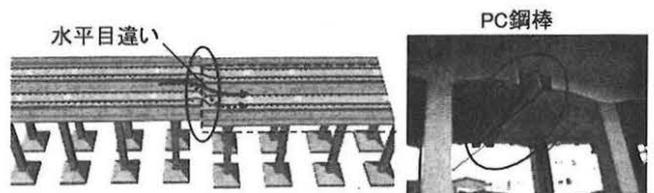


図3 高架橋目違い対策

な構造であり、スラブ軌道の本格的な採用に伴うたわみ等の変位規制からゲルバー式の構造が主となった後の新幹線高架橋と異なる。これらの構造的な特徴に起因して、

地震時に水平方向の振動変位や、隣接する高架橋間での不同変位（水平目違い）が大きくなるのが想定されるため、これらを極力抑制することが肝要である。

2.1 高架橋変位対策の補強仕様

高架橋変位対策は、図2に示すように高架橋の柱の間にもX型ブレース工法を施工することで、地震時の高架橋での揺れの増幅を抑制する対策である。

X型ブレース工法は、既存高架橋の耐震補強工法の一つとして実用化した工法⁵⁾で、ブレース（H断面）とブレース中央部に位置する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、ダンパー部の負担力を高架橋本体の降伏耐力の2倍程度とし、想定地震に対して損傷レベル2（または1）に抑える補強仕様⁶⁾を標準とした。また、高架橋下空間の利用や施工性を勘案し、橋軸直角方向の2断面にのみ設置するとともに、土被り分を敢えて掘削せず、地上部分にて設置して変位抑制する補強仕様とした。

2.2 高架橋目違い対策の補強仕様

高架橋目違い対策は、図3に示すように隣接する高架橋間をPC鋼棒で連結することで、地震時に高架橋間では生じる水平目違いを抑制する対策である。

目違い防止工（PC鋼棒）の諸元としては、東海地震対策の一環として検討されたPC鋼棒による連結拘束に着目して、当時の検討地震動（1968年十勝沖地震での八戸波（NS成分）最大加速度300Gal）から、今回想定する兵庫県南部地震以降の大規模地震を踏まえPC鋼棒の径をφ17mmからφ32mmへと変更した⁷⁾。

3. 高架橋の変位抑制対策の機能確認

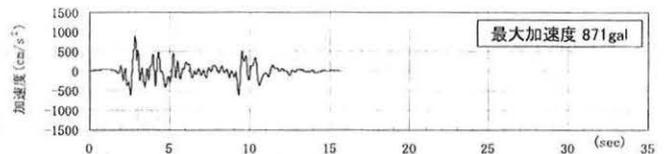
3.1 高架橋の変位抑制対策の解析検討

X型ブレース工法による高架橋変位対策の効果を確認するため、動的解析による応答変位を比較した。検討した高架橋は、標準的な東海道新幹線のラーメン高架橋（1層2柱3径間ラーメン高架橋：橋長24m、スパン3m+6m@3+3m、高さ7.0m、柱断面寸法0.6m×0.6m）である。また、検討地震動には、図4に示すL2設計地震動（SpecII, G3地盤）⁸⁾と想定東海地震波（G3地盤）⁹⁾を用いた。

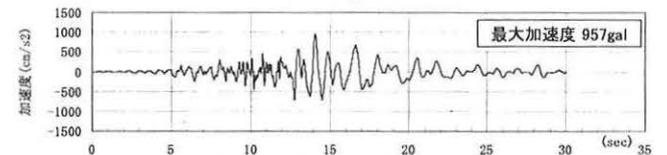
解析結果の一例として、想定東海地震波に対する解析結果を図5に示す。高架橋天端-地表面の相対変位について、X型ブレース工の有無を比較している。図5より、無対策での地表面に対して最大変位振幅約26cmから、対策により約3cmへと変位増幅が約1/8へ抑制されることを確認した。なお、このX型ブレース工による高架橋変位対策をした高架橋天端の応答波形を用い、実台車を用いた振動台実験等を実施し、脱線防止ガードの有効性を確認している。

一連の脱線・逸脱防止対策の検討¹⁾を踏まえ、今回提案するX型ブレース工の補強仕様により向上した高架橋の橋軸直角方向の剛性を、脱線防止ガードを有効に機能させる高架橋の要求性能とした。また、その閾値としては、標準高架橋（高さ7.0m、柱断面寸法0.6m×0.6m、無補強）の橋軸直角方向の柱剛性（EI）を1.0とした場合の剛性比を指標とし、剛性比4.8と設定した。

また、高架橋目違い対策のPC鋼棒等の仕様については、図6に示すような地震時の挙動に差異が生じる基礎条件の極端に異なる2ブロックの高架橋を想定し、この隣接する高架橋間の相対変位（目違い）を抑制する対策工を解析的に検討した。目違い防止工（PC鋼棒）は、2



(a)L2設計地震動（SpecII, G3地盤）



(b)想定東海地震波（G3地盤）

図4 検討地震動

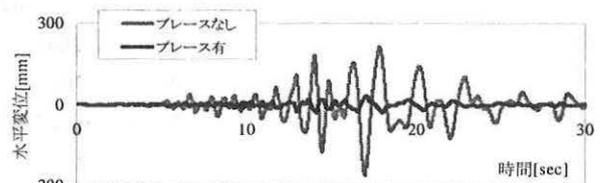


図5 高架橋応答変位の比較（想定東海地震波）
高架橋天端-地表面の相対変位

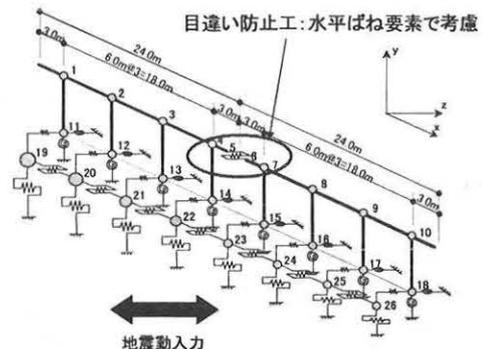


図6 高架橋目違い対策の解析検討の概要



図7 高架橋目違い対策の定着部仕様の解析検討

つの高架橋を連結する水平ばね要素で考慮し、動的解析を実施し、L2地震や東海地震による作用荷重に対して、PC鋼棒が降伏、破断しない強度となるよう、PC鋼棒の仕様をφ32mmと設定した。また、図7に示すようなFEM解析等により、変更したPC鋼棒の仕様に合わせた定着部の構造仕様とした。

3.2 高架橋の変位抑制対策の実験検討

高架橋の変位抑制対策の効果等を確認するため、標準的な鉄道高架橋を模擬した縮小試験体を用い、X型ブレース工による高架橋変位対策、PC鋼棒連結による高架橋目違い対策の組み合わせ、入力地震動をパラメータとして振動台実験を実施した。

試験体は標準的な鉄道高架橋（鉄筋コンクリート1層

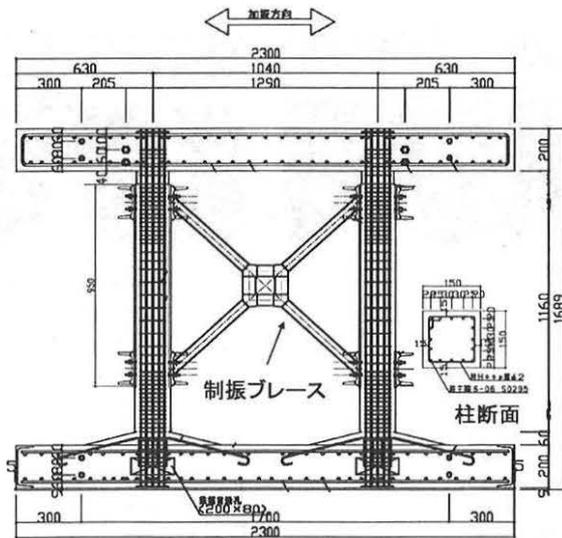


図8 試験体概要図 (RC 架構, ブレース)

2 柱式ラーメン高架橋) を模擬し, 架構寸法 1/5, 柱断面 1/4 縮尺として, せん断余裕度を実際の高架橋と等価となるようモデル化して作成した. 柱主筋の鉄筋比は $p_s=2.25\%$, せん断補強筋比は $p_w=0.07\sim 0.21\%$, せん断余裕度は 1.31 である.

RC 架構およびブレースの概要を図 8 に, 目違い対策工の配置概要を図 9 にそれぞれ示す. また, 使用材料の性質を表 1 に, 相似則一覧を表 2 にそれぞれ示す.

X 型ブレース工は, 前述のように想定地震 (L2 地震, 想定東海地震) に対し, 損傷レベル 2 (または 1) となるよう設計し, 橋軸直角方向断面に 2 基 (1 対) 設置した. なお, 耐震補強された既存高架橋を想定し, 柱部材には鋼板巻き補強 (鋼板厚 $t=1.2\text{mm}$) し, その上からブレースを設置した. また, 実施工を踏まえ地上部でのブレース設置を意識し, 土被り分 $1.5D$ (D : 柱幅) 柱下端を空けた.

目違い対策工は, 実高架橋の補強仕様 (PC 鋼棒: $\phi 32\text{mm}$ B 種 1 号) における PC 鋼棒の伸び剛性と試験体の PC 鋼棒の伸び剛性とが整合するようにモデル化し, $\phi 9.2\text{mm}$ B 種 1 号の PC 鋼棒とした. なお, 隣接高架橋との不同変位を強制的に発生させ, 目違い防止工に対して厳しい条件となるよう, 剛な隣接高架橋を模擬したフレームを試験体の前後に配し, 目違い対策工を配置した.

入力地震動は, 前述の図 4 の各地震動を用い, 相似則にしたがって, 高架橋降伏震度と地震波加速度振幅の比, 高架橋固有周期と地震波の周波数特性の比が整合するように, 加速度と時間軸を調整した入力地震動で橋軸直角方向へ加振した. また, 計測は加速度計による応答加速度, レーザ変位計等による応答変位, 柱部材の鉄筋 (主鉄筋, 帯鉄筋), ダンパー・ブレースや目違い防止工 (PC 鋼棒) の鋼材ひずみを計測した.

また, 変位抑制の目標レベルとして, 変位制限標準¹⁰⁾ による L1 地震に対する建造物の応答に伴う軌道面の不同変位の限界値を参考として, バラスト軌道の 270km/h 走行における限界目違い量を設定した. 高架橋に不同変位 (目違い) が生じた場合, 図 10 に示すように, バラスト軌道では, ある区間長にて不同変位に伴うレール変形 (角折れ) が発生すると考えられる. 270km/h 走行におけるこのレール変形 (角折れ) の限界値 θ_L を生じさせる高架橋間の目違い量を限界目違い量と設定した. 具体的には, レール変形の区間長を, 既往の研究によるバラ

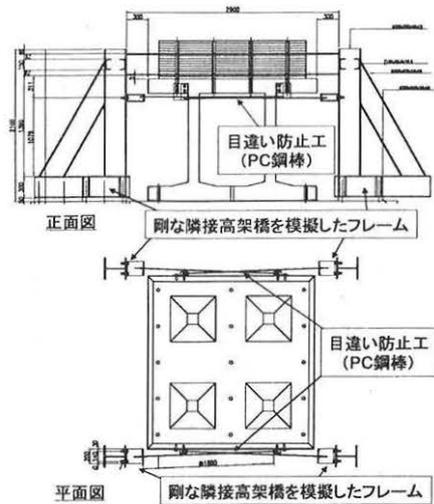


図9 試験体概要図 (目違い防止工配置)

表 1 使用材料一覧

鋼材使用部位	寸法	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)	
柱鉄筋	主筋	D6	SD295	368	536	1.87
	帯筋	$\phi 2$	規格外	189*	285	1.17
柱鋼板巻き補強	t1.2	規格外	230*	347	1.98	
ダンパーパネル材	t3.2	SS400	287*	453	2.07	
目違い防止工	$\phi 9.2$	B種1号	1157*	1208	2.06	

*: 0.2% オフセットひずみにより降伏強度を算出.

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)
24-18-13N	31.6	2.39	2.42

表 2 相似則

物理量	相似比	物理量	相似比
長さ	$1/\lambda$	剛性	$1/\lambda$
ひずみ	1	固有周期	$1/\sqrt{\beta\lambda}$
応力度	1		
加速度	β	速度	$\sqrt{\beta/\lambda}$
質量	$1/(\beta\lambda^2)$		
力	$1/\lambda^2$	$(\lambda=5, \beta=1.55)$	

レール変形: 角折れ (平行移動)

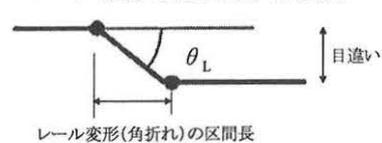


図 10 レール変形—不同変位 (目違い)

スト軌道による実物大の水平目違い試験¹¹⁾ を参考にして 4.8m と想定し, 限界目違い量約 3cm を設定した.

振動台実験の結果の一例として, 想定東海地震波に対する加振後の試験体の状況を図 11 に, 荷重—変位関係を図 12 にそれぞれ示す.

ブレースなし (変位抑制対策なし) の場合では, 地震動により柱部材が降伏, さらに大きく塑性変形する曲げ損傷の挙動を呈した. また, 高架橋の倒壊には到らないが残留変形が生じた (図 11(a), 図 12).

一方, ブレース補強 (変位抑制対策あり) の場合では, 目違い工の有りの無しの両ケースともに, 加振による柱部

材の損傷はなく、一部主筋の降伏は生じたが、ほぼ弾性応答の挙動を呈した(図11(b), 図12)。

最大応答変位は、想定東海地震に対し、「X型ブレース補強のみ」の場合で約6.5mm(部材角1/150程度)、「X型ブレース補強+目違い防止工」で4.0mm(部材角1/290程度)である。荷重変位曲線も無対策と比べてX型ブレース補強ありは立ちあがっており、ブレース補強による高剛性化が確認できる。また、変位拡大図(図12(b))からも「目違い防止工」が加わることで、より変位抑制効果が高いことが確認できる。なお、L2地震動に対しても想定東海波と同様に変位抑制対策の効果を確認した。

今回の試験体は、縮尺1/5程度のため、表2の相似則に従い、実験計測変位を5倍して、実大高架橋での応答変位を推定する。標準的な高架橋にX型ブレース補強を設置することで、応答変位は想定東海波に対して約3cm(6.5mm×5=33mm)へ抑制されたこととなる。また、目違い防止工を加えることで、最大応答変位は約2cm(4.0mm×5=20mm)へさらに抑制されたこととなり、想定した限界目違い量約3cmを満足することを確認した。

4. 結論

高架橋変位対策、高架橋目違い対策の脱線・逸脱防止対策について、解析、実験検討により、想定する地震動に対して、以下の知見を得た。

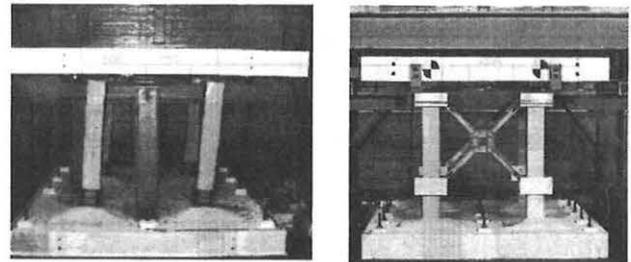
- (1) X型ブレース工の高架橋変位対策により、高架橋の剛性向上と横方向の振動変位の高い抑制効果が得られ、L2地震、東海地震に対して、十分な構造性能となることを確認した。
- (2) PC鋼棒連結の高架橋目違い対策により、隣接高架橋間の不同変位(水平目違い)を抑制でき、さらに、ブレース補強との組み合わせで、想定する限界目違い量以下の応答に抑制でき、高架橋区間の列車走行性へ有効となることを確認した。
- (3) 脱線防止ガードを有効に機能させる高架橋変位対策、高架橋目違い対策の補強仕様を提案した。

また、脱線防止ガードを有効に機能させるための高架橋の変位抑制対策について、その仕様と効果等を述べたが、地震時の車両、軌道、構造物の動的相互作用を考慮した数値解析シミュレーションを別途構築し、連続する高架橋区間での列車と構造物の動的相互作用解析を実施して、対策の組合せの効果についても確認している¹²⁾。

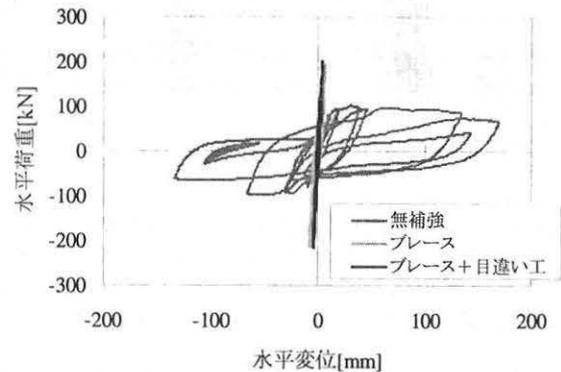
今後さらに研究、開発に努め、安全・安定輸送の強化に取り組んでいく。

参考文献

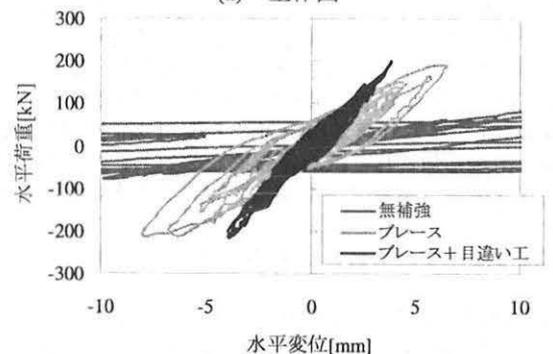
- 1) 森村勉, 関雅樹: 新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について, J-Rail2009(投稿中), 2009.12.
- 2) 三輪昌弘, 坂上啓, 足立昌仁, 村松浩成: 実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験, J-Rail2009(投稿中), 2009.12.
- 3) 足立昌仁, 森村勉, 石川栄, 深田淳司, 曄道佳明: 地震時の脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する研究, J-Rail2009(投稿中), 2009.12.
- 4) 荒鹿忠義, 吉田幸司, 庄司朋宏, 村松浩成: 軌道強化と土木構造物変位抑制による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策, J-Rail2009(投稿中), 2009.12.
- 5) 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.



(a)対策なし (b)ブレース補強+目違い工
図11 試験体の状況(想定東海地震波加振後)



(a) 全体図



(b) 変位拡大図

図12 荷重変位関係の比較(想定東海波加振)

- 6) 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集, Vol.29, No.3, pp.907-912, 2007.
- 7) 吉田幸司, 阿知波秀彦, 関雅樹, 曾我部正道: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.919-924, 2008.
- 8) 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.
- 9) 中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」: 中央防災会議 東海地震に関する専門調査会報告書, 2002.12.11.
- 10) 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), 2006.2.
- 11) 佐藤吉彦, 三浦重, 高井秀之, 長沢孝哉: 高架橋の水平目違いおよび水平角折れに対する軌道の変形特性試験, 鉄道技術研究所速報, No.A-85-61, 1985.3.
- 12) 前田昌克, 阿知波秀彦, 関雅樹, 松浦章夫: 地震時構造物の相互作用を考慮した車両運動シミュレーション, J-Rail2009(投稿中), 2009.12.