

鉄道長大橋りょうの支承免震化を考慮した地震時列車走行性解析

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○徳永宗正 古屋卓稔 豊岡亮洋 岡本大 曾我部正道 室野剛隆
四国旅客鉄道(株) 正会員 中田裕喜 宇野匡和

1. 目的 長大河川橋梁は、一般に橋脚が高くまた橋梁負担重量も大きいので、等価固有周期が長くなり地震時列車走行性の確保が課題となる^{1),2)}。現在、橋長450mで5径間連続桁である北浦港橋梁(以下、北浦港B)において、支承の免震化による橋脚の耐震補強の計画が進められている^{3),4)}。鉄道長大橋においては、新設構造物に対して免震支承や滑り支承を用いて耐震設計の合理化を図った例^{例えば5)}はあるが、既設橋りょうに対して地震対策のために支承を免震化した例は過去に無い。これは、支承免震化による構造物の振動特性の変化や、支承変形に伴う桁の応答変位の増大に起因する地震時列車走行性の低下が懸念されていることがその一因と考えられる。加えて、免震化橋梁のように特殊な構造形式の場合、地震時の動的挙動を単純に推定することが難しく、変位標準に示された設計振動単位毎の振動変位や不同変位に関する照査法等を適用することはできない。このような背景から本稿では、既設の北浦港Bを対象として、計画中の支承免震化を実施した場合の地震時列車走行安全性について検討を行った。

2. 解析手法 図-1に、対象橋りょうの概念図と構造物の力学モデルを示す。図に示すように、連続桁は設計計算書に基づく断面諸元を持つ梁要素で、免震支承、橋脚は図中に示す骨格曲線および履歴特性を持つ非線形ばね要素でモデル化した。免震支承の非線形特性は、別途行われた2自由度系の簡易なパラメータ解析により、各設計条件を満たす支承の仕様として設定した³⁾。橋脚の非線形特性は、別途耐震標準に準拠して行われた静的非線形解析に基づき、地盤の支持力係数 α_f が2.0、材料修正係数 ρ_m が1.2の場合の骨格曲線を定めた⁴⁾。減衰はモード別減衰として設定し各振動モードの減衰比を5%とした。

図-2に、車両の力学モデルを示す⁶⁾。力学モデルの妥当性は、実物大車両模型を用いた検証実験により既に確認されている⁷⁾。車両は近年の高速新幹線車両を参考に諸元を設定し、0.8Hzの下心ロールと1.3Hzの上心ロールの固有振動モードを有する。列車は8両編成とし、走行速度は130km/hとした。

図-3に、車輪/レール間の相互作用の力学モデルを示す⁶⁾。脱線前の車輪/レール間の相互作用力は、両者の鉛直方向相対変位および水平方向相対変位を用いて算定した。

図-4に、入力地震動波形を示す。入力波は、別途実施した強震動予測手法に基づく地震動評価により当該地点を対象として算出したもので、L1地震動相当のものである³⁾。

解析パラメータおよびケース数は、支承の免震化の有無で2通り、走行線の上下で2通り、走行開始位置を150m毎に変化させた12通り、地震動の入力倍率が1.0~3.0倍の11通りとし、計528通りの解析を行った。車輪とレールの相対水平移動量を評価指標として用い、その限界値は、車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表す $\pm 70\text{mm}$ とした。

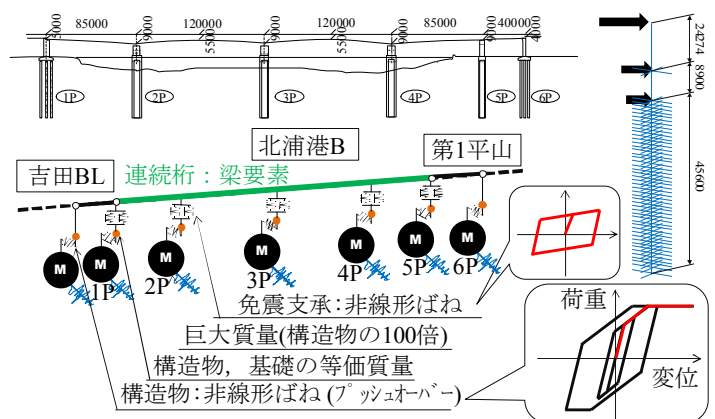


図-1 対象橋りょうの概念図と構造物の力学モデル

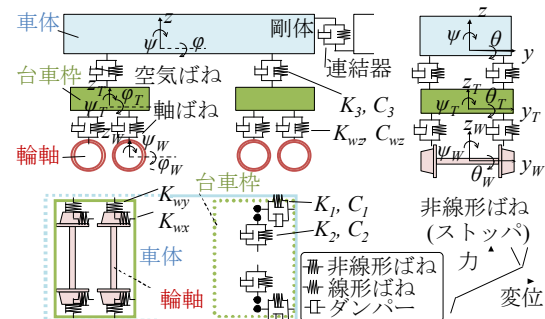


図-2 車両の力学モデル

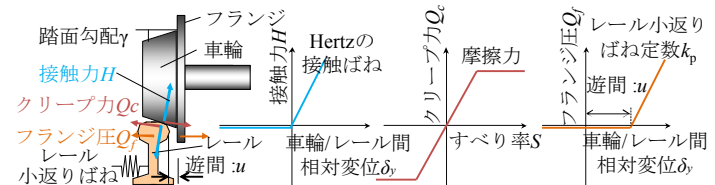


図-3 車輪/レール間の相互作用の力学モデル

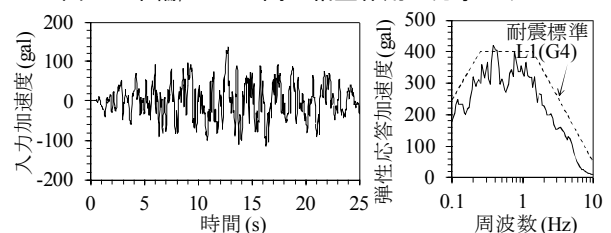


図-4 入力地震動

キーワード: 連続 PC 桁, コンクリート, 免震, 地震時列車走行性, 動的相互作用解析

連絡先: 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室 TEL:042-573-7290

3. 解析結果 図-5 に、免震化前に脱線が発生したケースの代表的な時刻歴波形として、地震動倍率 1.6 倍で下り線走行の結果を示す。図から、600m 付近にて前台車の輪軸 1, 2 の車輪上昇量が大きくなり北浦港 B の 3P, 4P の中間付近にて脱線している。脱線前の、車体水平変位、車体ロール角に着目すると、車体ロールが水平変位に若干遅れており、典型的な下心ロールの応答となっていることが分かる。

図-6 に、構造物の最大応答値および脱線限界地震動倍率を示す。免震化前の場合、下り線走行においては、P4 橋脚付近 (500m 付近) において脱線発生地震動倍率が 1.6 倍を示しており、脱線位置の直前に角折れ発生がないことから振動変位が脱線の支配要因と考えられる。上り線走行においては 1P, 2P 橋脚付近 (200, 300m 付近) において脱線発生地震動倍率が 1.8 倍を示しており、上記と同様に振動変位が脱線の支配要因と考えられる。免震化後の場合、免震化前と比較して脱線の発生ケースが顕著に減少しており、脱線発生地震動倍率は北浦港 B の 4P 橋脚付近において 1.8 倍程度である。地震動倍率が 1.0 倍の場合、支承免震化の影響で構造物の応答加速度は 3 m/s^2 程度から 2 m/s^2 程度へと、構造物の応答変位は 130mm 程度から 60mm 程度へと大きく低下している。支承免震化により免震支承には 80mm 程度の変形が発生する一方、連続桁端部に発生する角折れ量には大きな変化はないことが分かる。

4. まとめ 本稿では、橋長 450m で 5 径間連続桁である北浦港橋梁を対象に免震化に関する検討を行い以下の結論を得た。①対象橋梁において、支承の免震化前、免震化後共に、L1 地震動に対する地震時走行安全性を満足している。②免震化後においては、脱線発生地震動倍率は 1P 橋脚付近において 2.8 倍程度、4P 橋脚付近において 1.8 倍程度であり、免震化前と比較して地震時走行安全性が向上する。③対象橋梁における脱線の支配要因は振動変位であり、連続桁端部に発生する不同変位 (角折れ) に対して一定の余裕度を有している。支承免震化により構造物の応答加速度が減少することから、地震時走行性が向上すると考えられる。

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) 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), 丸善, 2012. 3) 中田裕喜他: 連続 PC 桁長大橋りょうに対する耐震補強のための免震ゴム支承置き換えに関する諸元選定解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 2016. 4) 古屋卓稔: 免震ゴム支承を用いた連続 PC 桁長大橋りょうの耐震補強に関する解析的検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 2016. 5) 曾我部正道, 青木一二三, 涌井一: 線路直角方向にすべり支承を用いた高架橋の地震時列車走行性解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No.3, pp.1075-1080, 2007. 6) 曾我部正道, 後藤恵一, 渡辺勉, 浅沼潔: 鉄道高架橋群の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線, コンクリート工学論文集, Vol. 32, No.2, pp.799-804, 2010. 7) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 72, No.706, pp.1849-1855, 2005.

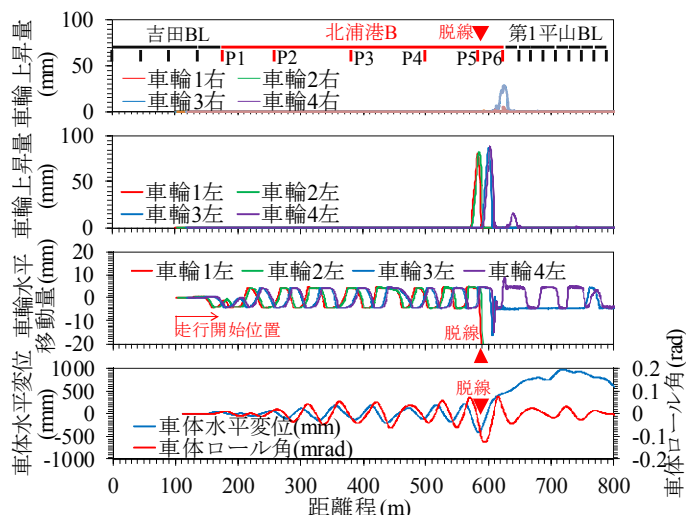
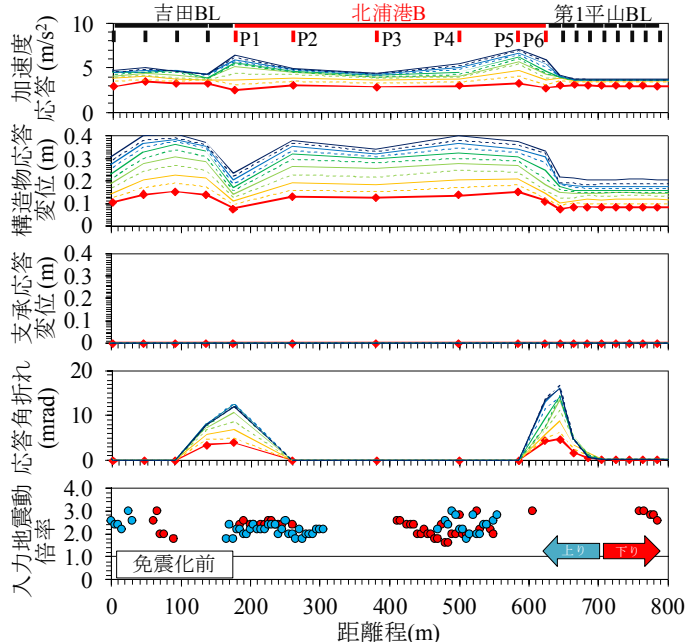
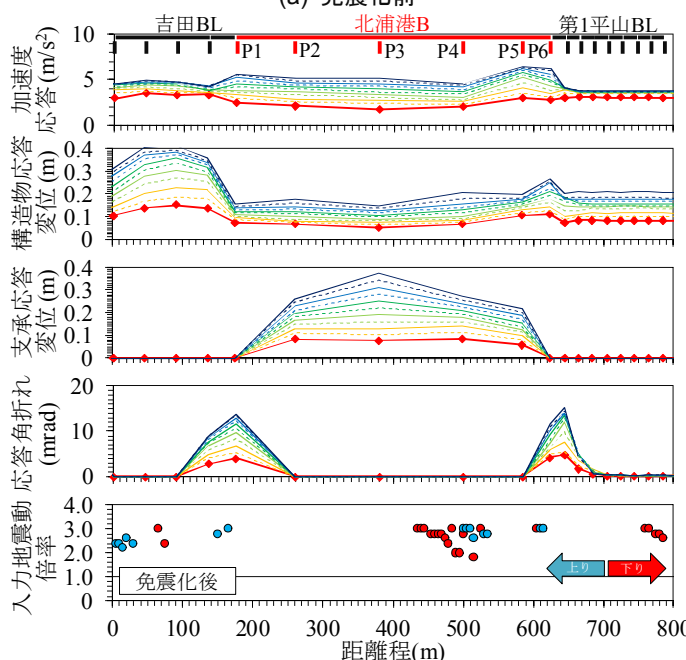


図-5 時刻歴波形



(a) 免震化前



(b) 免震化後

図-6 構造物の最大応答値および脱線限界地震動倍率