

高速鉄道PC桁の外ケーブル補強に対する上反り制限に関する検討

鉄道総研 正○曾我部正道 鉄道総研 正 徳永 宗正 鉄道総研 正 後藤 恵一

1. 目的 PC 桁の外ケーブル補強工法は、道路橋等において既に手法が確立されており、2007 年度までに 75 の補強事例が報告されているが、鉄道橋に関してはこれまでに施工事例が報告されていない¹⁾。この背景には、鉄道橋では、設計活荷重の改訂が行われていないこと、主ケーブルの破断事例の報告が少ないこと等が挙げられるが、一方でグラウト不良に起因する PC 鋼線の破断も懸念されており、工法の適用性の検討が進められている。高速鉄道 PC 桁へ外ケーブル補強を適用する場合、補強圧縮力の偏心や、クリープの再進展に伴う桁の上反りの発生とこれによる列車走行性への影響が懸念される。そこで、本研究では、高速列車走行に対する上反りの限界値を推定するとともに、この観点から外ケーブル補強の適用性について検討した。

2. 解析方法 検討には、車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III を用いた。図-1 に車両の力学モデル (31 自由度) を示す。ここで、車両は、車体・台車枠・輪軸がばねとダンパーでそれぞれ結合された三次元質点としてモデル化されている。車両諸元は現在主流の軽量高速車両を参考とした。図-2 に車輪とレール間の鉛直方向の力学モデルを示す。車輪とレール間のモデルでは、それぞれの幾何形状を考慮して接触位置と接触角を算定し、接触面法線方向の車輪とレールの相対変位 δ と接触力 H との関係を Hertz の接触ばねにより表現した。構造物の力学モデルには、概略評価用の半正弦波モデルと詳細評価用の動的相互作用モデルを用いた。図-3 に構造物の半正弦波力学モデルの概念図を示す。半正弦波モデルでは、桁のたわみ形状を半正弦波と仮定し、輪軸の走行軌跡に基づきモデル化した。桁の両端には角折れによるレールの変形形状を表すものとして、弾性床上の梁の理論に基づく緩和区間を設けた。図-4 に構造物の動的相互作用力学モデルの概念図を示す。動的相互作用モデルは桁全体を梁要素でモデル化した。桁の基本固有振動数は新幹線 PC 桁の標準設計を参考に $70L_b^{-0.8}$ 及び $40L_b^{-0.8}$ と仮定した。外ケーブルの剛性の影響は無視した。桁の減衰定数は 2% とした。桁の外ケーブル補強による上反りを想定する場合は、動的相互作用力学モデル上に、図-3 で示した半正弦波を桁の上反りとして入力した。数値解析による走行安全性の評価は、輪重減少率を用いて行った。輪重減少率の制限値は複線、最大積載に対して 37% (0.37) であるが、ここでは単線、定員積載で実際の営業線での上反り管理を行うことを想定し、その 1/2 程度となる 15% を用いることとした³⁾。乗り心地の評価は、設計では Janeway の乗り心地曲線をベースとした乗り心地係数により行なわれる。しかしながら、本検討のように実際の営業線での上反り管理を想定した場合にはより厳しい限度値が必要である。これまでの過去の経験から実態ベースの評価にはより厳しい 0.5m/s^2 を用いることとした³⁾。この値は、営業線の軌道管理において、影響を及ぼさないレベルという位置づけで安全側に設定している。加速度の評価点は台車直上の車体床面とした。

3. 解析結果 図-5 にスパン $L_b=50\text{m}$ 、上反り $L_b/10000$ 、基本固有振動数 $40L_b^{-0.8}$ の場合の時刻歴波形を示す。図は 1 次共振時の解析結果である。輪軸走行軌跡から、スパン 1/4、3/4 付近で上反りの相殺効果が確認できるも

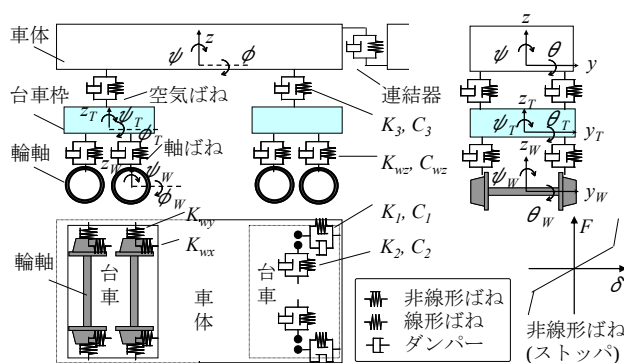


図-1 車両の力学モデル

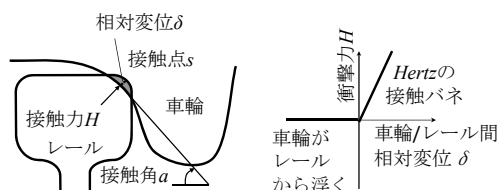


図-2 車輪とレール間の鉛直方向の力学モデル

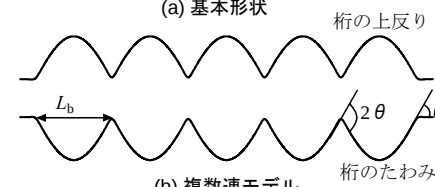
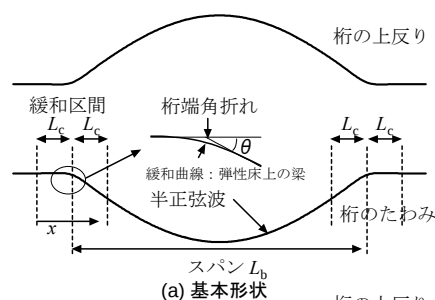


図-3 構造物の半正弦波力学モデル

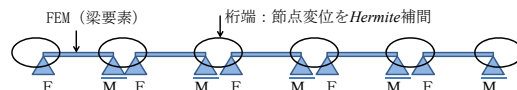


図-4 構造物の動的相互作用力学モデル

キーワード PC 桁、外ケーブル補強、たわみ、列車走行性、クリープ
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造力学

TEL 042-573-7290

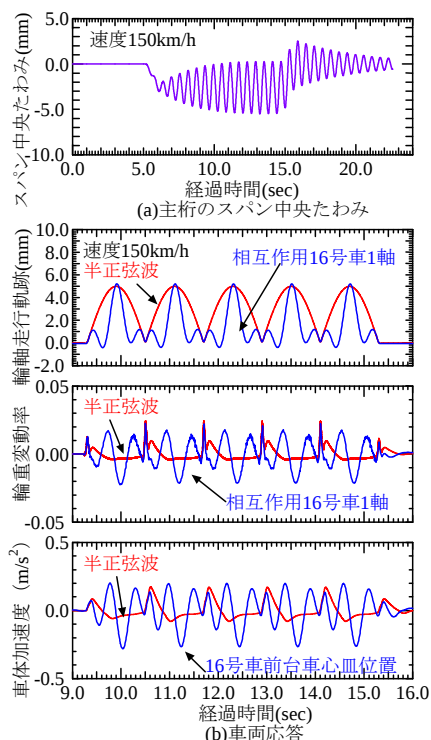


図-5 時刻歴波形の例
($L_b=50\text{m}$, 上反り $L_b/10000$, 基本固有振動数 $40L_b^{-0.8}$)

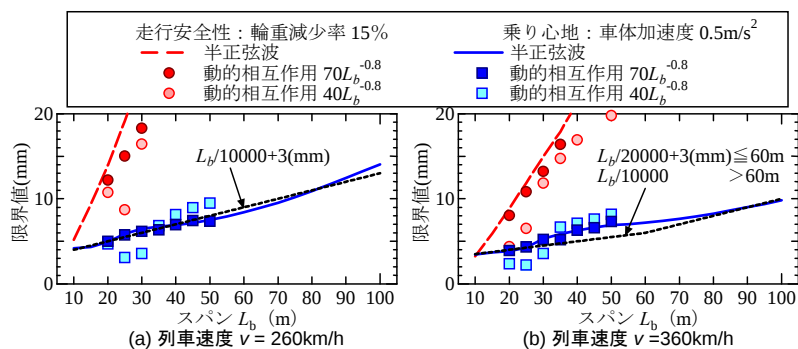


図-6 外ケーブル補強で用いる限界値

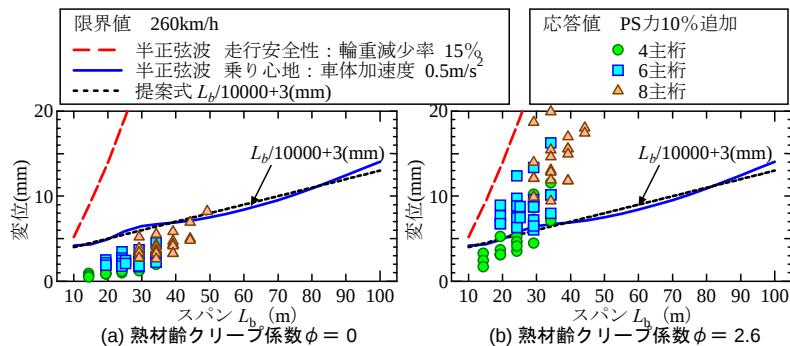


図-7 外ケーブル補強による上反り量の算定結果と限界値の比較

の、中央付近では桁の共振により振幅が増加し波形も高周波にシフトしていることが分かる。このため、スパン 1/4, 3/4 付近には輪重変動、車体加速度とも半正弦波の場合には見られない新たなピークが出現し、波形が乱れ挙動が複雑となっている。このような場合には、桁の上反りが必ずしもたわみを相殺しないことが分かる。

図-6 に外ケーブル補強で用いる限界値を示す。例えば、列車速度 260km/h に対しては $L_b/10000+3\text{mm}$ を提案した。変位標準³⁾と同様に半正弦波モデルの解析値をベースとして列車速度ごとの制限値を示したが、桁剛性が低く桁が共振する場合には図-5 に示したように挙動が複雑となるため、半正弦波加振の結果を用いた設計上の照査手法は適さない。このような場合には、動的相互作用解析で検討を行うことが望ましいといえる。

4. 考察 提案した限界値を用いて外ケーブル補強の高速鉄道 PC 桁への適用性について検討した。ここでは、新幹線の 70 種類の標準桁を検討対象とした。検討ではまず、死荷重 D 、列車荷重 L 、衝撃荷重 I による縁引張応力度が許容応力度以内となるように、当初有効プレストレス力を推定した。この有効プレストレス力の 10% を新たに PC 桁に付与する外ケーブル補強の有効プレストレス力と仮定して、PC 桁の上反り量を求めた。また、外ケーブル補強を実施する直前、軌道は水平に整備されていると仮定した。熟材齢の既設 PC 桁において、クリープ変形がどの程度進むかについては、必ずしも十分な実証データが得られていない。ここではクリープ係数 $\phi=0$ と、新設構造物の設計で用いられる $\phi=2.6$ を用いることとした。図-7 に外ケーブル補強によるスパン中央の上反り量の算定結果と限界値の比較を示す。10%の有効プレストレス力の付加に対して、クリープ係数 $\phi=0$ の場合には、概ね限界値以内に収まっている。一方、 $\phi=2.6$ を用いると限界値を超える場合がみられ、特に剛性の低い多主桁の場合にその傾向が強い。ただし、本研究で用いた乗り心地の限界値は、超過しても列車の運行を即座に阻害する性質のものではなく、また通常、レール締結装置も調整能力を有していることを注記しておく。例えば、一般的な直結 8 形締結装置の場合、軌道パッド下で +10mm、タイプレート下 +20mm の調整が可能であるため、桁端部を上反りに合せて持ち上げることで数 mm 程度の対応は可能であると考えられる。実務では、非構造部材の剛性の影響等も含めて、これらの影響を総合的に勘案して補強設計を行う必要がある。

5. まとめ ① 数値解析により、外ケーブル補強による上反り量の限界値として、列車速度 260km/h に対して $L_b/10000+3\text{mm}$ を提案した。② 桁剛性が低く、列車走行により桁が共振する場合には、桁の振動挙動が複雑となるため、動的相互作用解析で検討を行うことが望ましい。③ 試算の結果、当初の有効プレストレス力の 10% を外ケーブル補強として付与した場合、熟材齢クリープを考慮しなければ限界値以内に収まる結果となった。本研究の一部は、国庫補助金を受けて実施された。

参考文献 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案) [改訂版]，2007 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強実例図集 [第 2 版]，2007 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)，2006