

論文 高速鉄道PC桁の外ケーブル補強に対する上反り制限

曾我部 正道*1・徳永 宗正*2・後藤 恵一*2・谷村 幸裕*3

要旨: 本研究は、高速鉄道PC桁に対して、外ケーブル補強による上反り制限を数値解析の観点から検討したものである。その結果、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。また、列車荷重によるPC桁のたわみは、必ずしも桁の上反りを効果的に緩和しないこと、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こと等を明らかにした。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、上反りの応答値は、概ね限界値以内に収まる結果となった。

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

1. はじめに

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¹⁾²⁾、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²⁾。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が懸念される。高速鉄道では、軌道に要求される整備限度が厳しく、連続する構造物の変位・変形もまた一種の軌道変位として車両の振動系を加振するため、車両の走行安全性と良好な乗り心地を確保するためには、これを制限する必要がある。

2006 年制定の鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)(以下、変位標準という)³⁾では、列車速度 360km/h までの桁のたわみ制限が規定されているが、桁の上反りに関する照査法に関しては特に規定は設けられていない。また既往の研究では逆の視点、即ちレールキャンパー(桁のたわみを相殺するように軌道に上反りをつけておくこと)の検討事例の報告⁴⁾⁵⁾があるが、上反りに関する網羅的・体系的な知見を得るまでには至っていない。

以上のような背景から、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論じた。

2. 解析手法

数値解析には新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS(Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structures)を用

いた⁶⁾。本手法の実用性については、様々な実測や車両試験台を用いて既に検証されている⁶⁾⁷⁾。

2.1 車両の力学モデル

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。車両諸元は変位標準作成時に用いたもので、現在主流となっている軽量高速の車両を想定したモデルである。列車編成は、後述する半正弦波モデルでは1両、動的相互作用モデルでは16両とした。

2.2 構造物の力学モデル

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-2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式(1)に示す緩和区間を設けた。

$$\begin{aligned}
 &x \leq L_c \\
 &y = \frac{\theta}{4\beta} e^{\beta(x-L_c)} \{ \cos \beta(x-L_c) + \sin \beta(x-L_c) \} \\
 &x \geq L_c \\
 &y = \frac{\theta}{4\beta} e^{-\beta(x-L_c)} \{ \cos \beta(x-L_c) - \sin \beta(x-L_c) \} + \theta(x-L_c)
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここに、 L_c は全緩衝区間の長さの 1/2, θ は桁端部の折

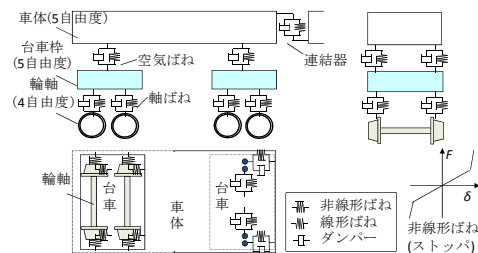


図-1 車両の力学モデル

*1(財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博(工) (正会員)

*2(財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 修士 (正会員)

*3(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 博(工) (正会員)

れ角, x は緩衝区間開始点からの距離である。 β は弾性床上の梁の相対的曲げ剛度で, 式(2)より求まる。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (2)$$

ここに k は単位長さ当たりのレール支持バネ定数, EI はレールの剛性である。複数のスパンが連続する場合を想定し, これを5回繰り返して検討に用いた。半正弦波モデルでは, 半正弦波は非振動の固定モデルで, 動的相互作用力は考慮されない。今回の検討では, 上下対称波形についても検討を行った。

図-3 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 $70L_b^{-0.8}$ 及び $40L_b^{-0.8}$ と仮定した。前者は, 新幹線 PC 桁の比較的高い桁剛性に, 後者は低い桁剛性に相当する。桁の重量は, 版上死荷重を 110kN/m に設定した。桁端の角折れについては, 式(1)と等価な検討となるように, 節点間を *Hermite* 補間した³⁾。外ケーブルの補強の桁剛性の影響は無視した。桁の減衰定数 ξ 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-2 で示した半正弦波を桁の上反りとして入力した。

2.3 車輪とレール間の力学モデル

図-4 に鉛直方向の力学モデルを示す。車輪とレール間の鉛直方向相対変位 δ_z は, 式(3)で表せる。

$$\delta_z = z_R - z_W + e_z + e_{z0}(y) \quad (3)$$

ここに, z_R と z_W はそれぞれレールと車輪の接触点における鉛直変位, e_z はレール上に存在する鉛直方向の軌道変位で, ここに図-2 で示した PC 桁の上反り形状が線路方向への離算データとして入力される。 e_{z0} は接触点における車輪の直径の初期接触点からの変動分で, 車輪とレールの水平方向相対変位 y の関数として表される。

相対変位 δ_z に対する接触点 s , 接触角 a は, 車輪とレールの水平方向相対変位 y と車輪及びレールの幾何学形状に基づき定めた接触関数から算出する。車輪とレールがそれぞれ二次曲面から構成されている場合, 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 との関係は, 式(4)に示すように *Hertz* の接触ばねにより表すことができる。

$$H = H(\delta) = H(\delta_z \cdot \cos a) \quad (4)$$

この接触力 H の鉛直方向及び水平方向の分力を車輪及びレールにそれぞれ与えて相互作用力とする。

水平方向には, 車輪とレール間の遊間, 両者の接触点における線形クリープ則, 車輪とレール接触時の小返りばねを用いているが, 本研究の結果には影響しないため

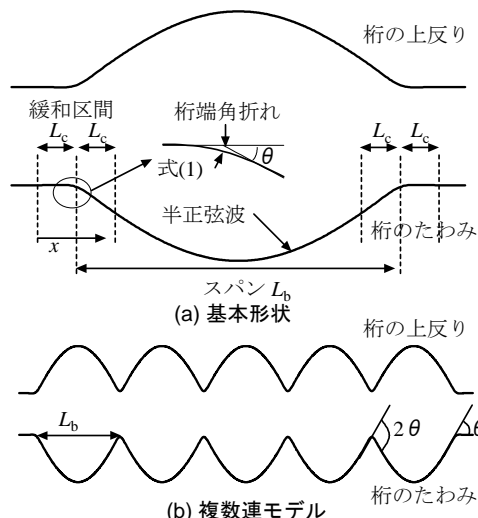


図-2 構造物の半正弦波力学モデル

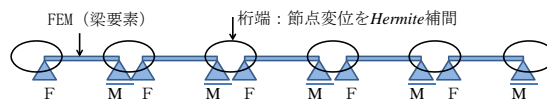


図-3 構造物の動的相互作用力学モデル

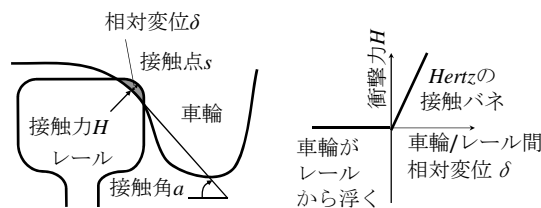


図-4 車輪とレール間の鉛直方向の力学モデル

表-1 解析結果の評価方法

列車に影響する項目	評価指標	設定限界値	記
走行安定性	輪重減少率	0.15	単線, 定員積載に換算
乗り心地	車体加速度	0.5m/s ²	片振幅: 単線定員換算

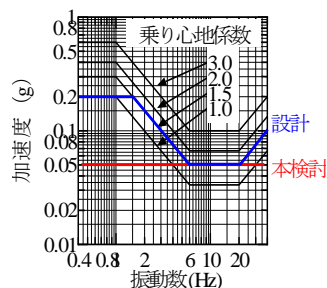


図-5 検討に用いた乗り心地指標

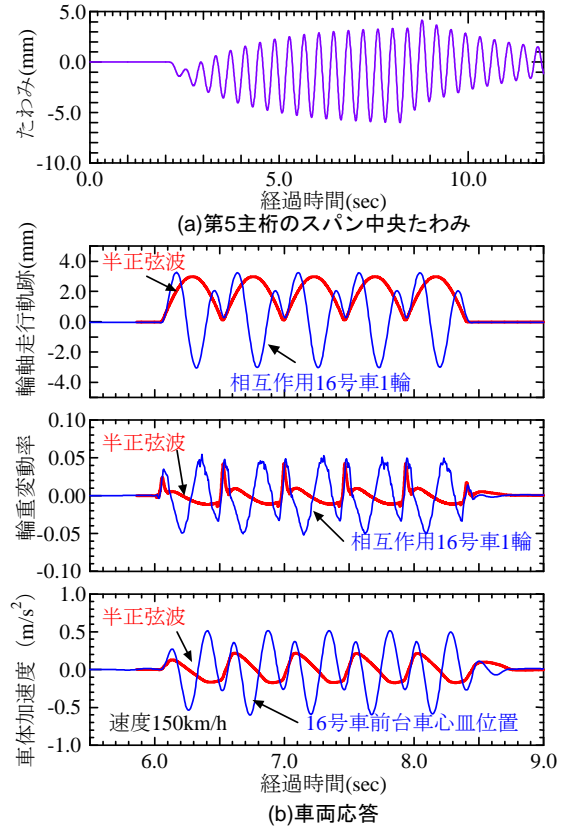
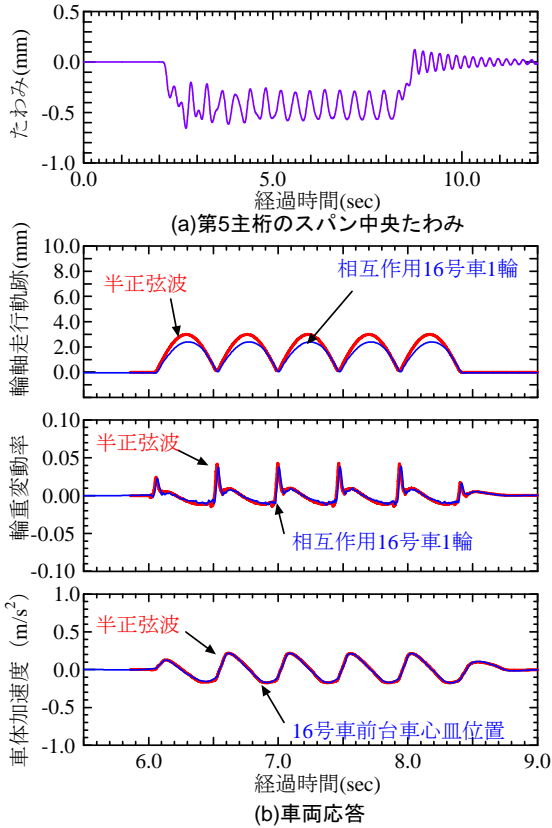
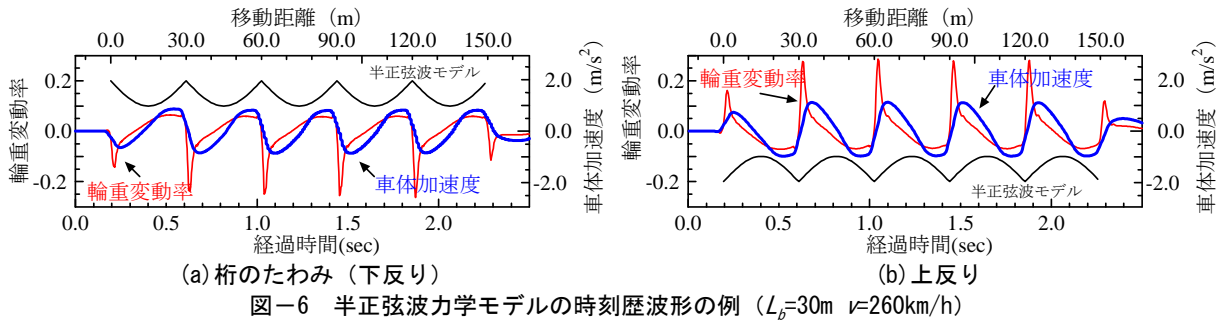
表-2 車両の固有振動数

振動モード	固有振動数(Hz)
車体上下	0.9
車体ビッチング*	1.0
車体上下+台車上下	6.6
車体ビッチング*+台車上下	6.6

説明を省略する。

2.4 数値解析法

効率的な数値解析を行うために, 車両及び構造物に關



する運動方程式をモーダル変換し、モーダル座標系上の運動方程式を、Newmarkの平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行う。

2.5 評価指標

表-1に検討に用いた評価指標を示す。列車走行性の評価は、走行安全性と乗り心地の観点から行う。

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⁾。

図-5に検討に用いた乗り心地指標を示す。乗り心地の評価は、設計ではJanewayの乗り心地係数を用いて行なわれる。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する。

3. 解析結果

3.1 車両の固有振動数

表-2に車両の固有振動数を示す。車体振動に起因するモードの固有振動数は1.0Hz前後、台車モードの固有振動数は6.6Hzとなった。

3.2 時刻歴波形

図-6に半正弦波力学モデルの輪重変動率及び車体加速度の時系列波形を示す。スパン $L_b=30m$ 、列車速度 $v=260km/h$ 、たわみ量 y は $L_b/2000$ として検討した(図-

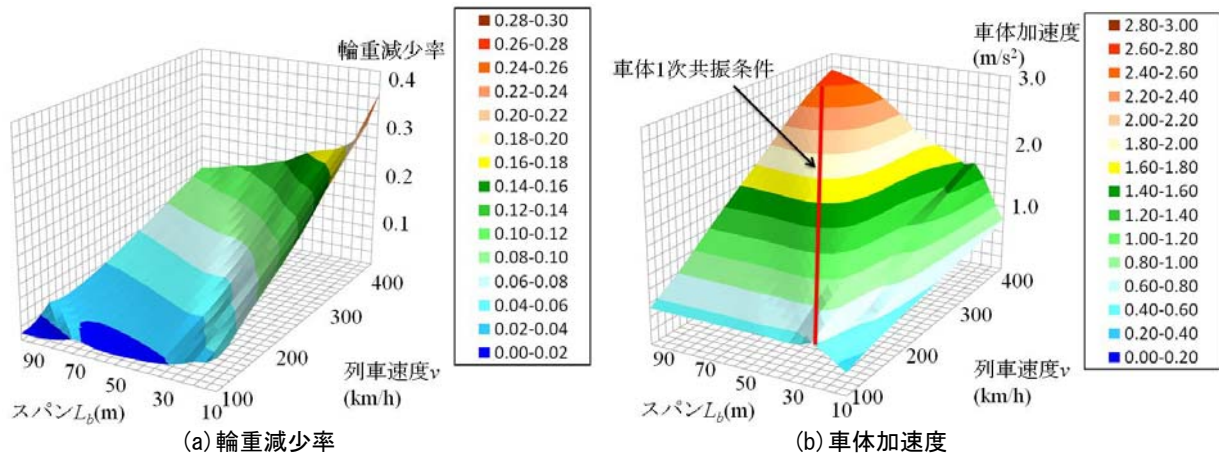


図-9 半正弦波力学モデルにおける車両応答の最大値(5連, 上反り $L_b/2000$)

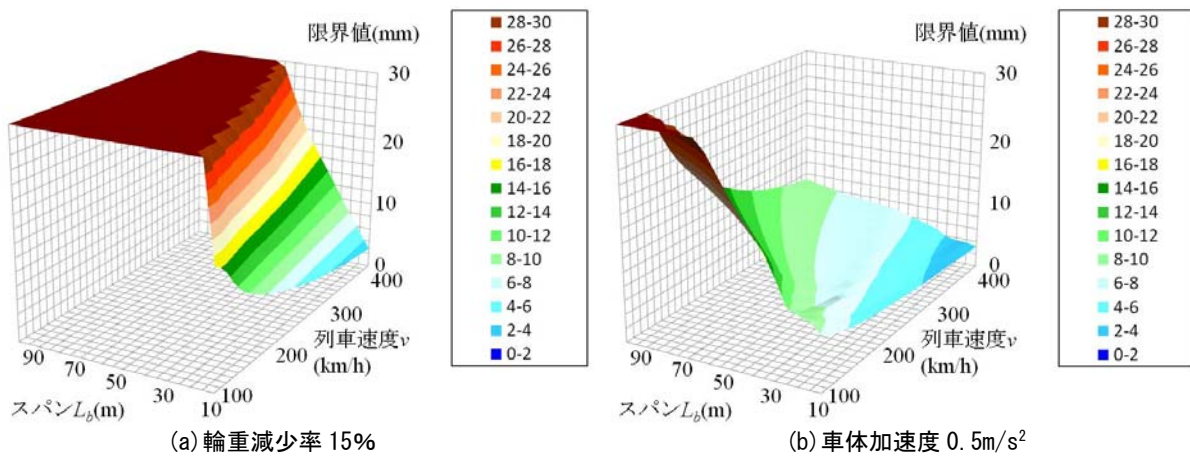


図-10 半正弦波力学モデルによる上反りの限界値の算定(5連)

2(b)参照)。図から車両の応答は、下反りと上反りで概ね対称となっていることが分かる。車両の振動系は線形となっており、非線形となる要素は車輪とレールの鉛直方向の接触力のみであるが、これについては今回の解析範囲ではほとんど影響していないことが分かる。走行安全性は、輪重変動の輪重減少側で評価されるため、桁端による角折れが輪重増加側となっている上反りの方が、輪重減少率としての応答が緩和される結果となる。このことから、上反りに関しては乗り心地が支配的となると推察される。乗り心地に関しては、絶対最大加速度で評価されるため、下反り、上反りとも同じ評価結果となる。図から、輪重変動率、車体加速度はともに、スパンを周期とし約2.4Hzで変動していることが分かる。桁端部以外の輪重変動率は、車体加速度と相似形であるが、桁端部では局部的な輪重変動が生じている。輪重変動の発生要因は、式(5)に示す桁端の角折れを通過する際に輪軸に生じる慣性力(遠心力)と、車体加速度により生じる変動の和であると説明できる。

$$F = m_w \cdot v^2 \cdot \Phi \quad (5)$$

ここに、 F は輪軸に生じる慣性力で、 m_w は輪軸の質量、

v は速度、 Φ は桁端に生じる曲率である。桁から桁へに移る場合に、端部(第1, 第5スパン)の桁端より大きな輪重変動が生じているのは、図-2に示したように境界部の角折れ量が両端部に比べ単純に2倍になっているためであると説明できる。

図-7にスパン $L_b=30\text{m}$ 、上反り $L_b/10000$ 、基本固有振動数 $70L_b^{-0.8}$ の場合の時刻歴波形を示す。輪軸走行軌跡から、動的相互作用解析では、半正弦波に対して上反りの低減効果が確認されるが、車両の応答の低減には至っていない。桁のたわみにより輪軸走行軌跡の波形が時刻方向にやや圧縮された形状になり、加振周波数が上昇したため車体加速度が低減されていないと推察される。

図-8にスパン $L_b=30\text{m}$ 、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、共振した場合の解析結果である。輪軸走行軌跡から、スパン中央位置での上反りの相殺効果は確認できるものの、桁の共振振動の重畳によりスパン $1/4$ 、 $3/4$ 付近に輪重減少を生じさせるようなピークが新たに出現し、複雑な挙動が生じている。波形が乱れ、入力周波数が上昇して台車モードの固有振動数に近づくことにより車体加速度は正負側ともに大きく増加している。

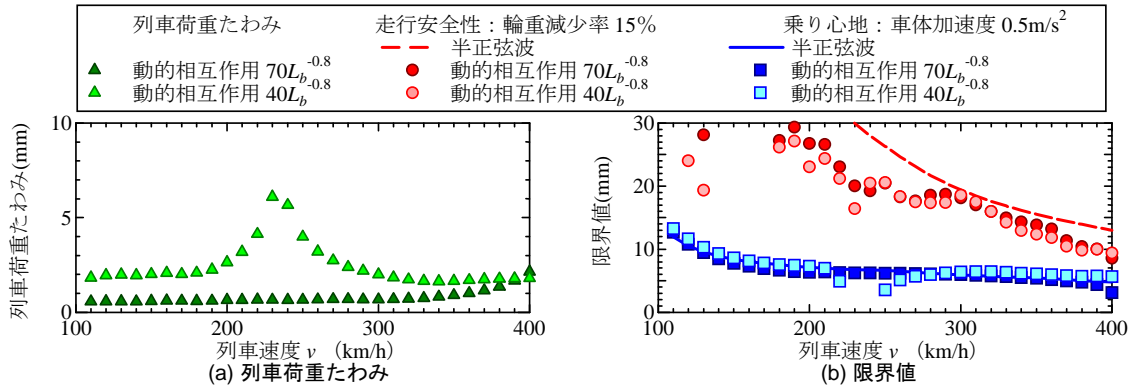


図-11 半正弦波モデルと動的相互作用モデル ($L_b = 30\text{m}$)

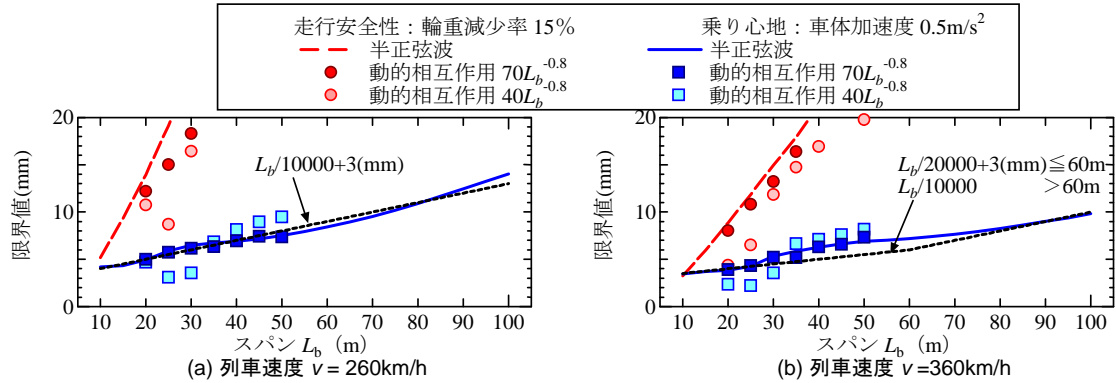


図-12 外ケーブル補強で用いる限界値

3.3 最大応答値

図-9にたわみ量 $L_b/2000$ における最大応答値の総括を示す。図から輪重減少率、車体加速度とも速度の増加に伴い応答が増加していることが分かる。

輪重減少率は、短スパンで応答が大きいが、これは、桁端の緩和区間長 L_c とスパン L_b が近接し、桁端の振動と桁形状による車体振動の加振振動数が近づくためであると考えられる。

車体加速度は、車体を加振する振動数が式(6)の場合、車体は1次共振となりピークが生じる(図中にラインで示した)。

$$v = f_v \cdot L_b \quad (6)$$

ここに、 v は車体が共振する列車速度、 f_v は表-2に示した車両の固有振動数、 L_b はスパンである。

3.4 限界値の算定

図-10に半正弦波力学モデルによる限界値を示す。図では、限界値の全体的な傾向を三次元で俯瞰した。輪重減少率から定まる上反りの限界値は、車体加速度から定まる上反りの限界値により包絡される結果となった。

図-11に半正弦波力学モデルと動的相互作用力学モデルの比較を示す。動的相互作用力学モデルで桁剛性が高い $70L_b^{-0.8}$ の場合、解析結果は半正弦波モデルの結果と概ね一致する。ただし、図からは桁のたわみが上反りを緩和する効果は確認できない。一方、動的相互作用力学モデルで桁剛性が低い $40L_b^{-0.8}$ の場合、桁が1次共振する

列車速度 240km/h 付近では上反りの限界値を算定できない。これは、図-8に示したように、車両の走行軌跡が複雑となり車体加速度が限界値に達するためである。

図-12に外ケーブル補強で用いる限界値を示す。変位標準³⁾と同様に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、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する。ここでは、新幹線の70種類の標準桁を検討対象とした。標準桁とは、設計の効率化を図るために、桁のスパン(15~60m)、使用区間(一般、雪害、貯雪)、高欄構造(一般、逆L等)、軌道構造(スラブ軌道、バラスト軌道)、主桁本数(4, 6, 8)、桁高等を網羅するように定められたものである。

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ている。

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。熟材齢であるため、その影響は少ないと考

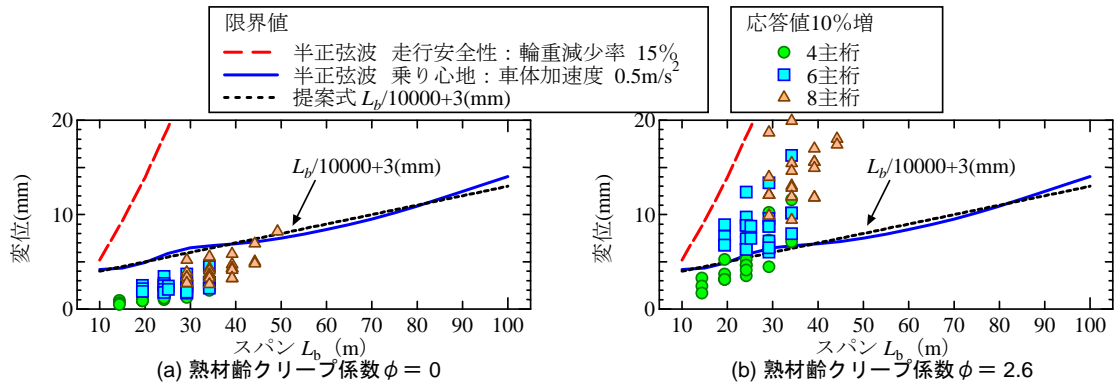


図-13 外ケーブル補強による上反り量の算定結果と限界値の比較

えられるが、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-13 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。これらの図において、追加するプレストレス力と上反り量、上反り量と車体加速度の関係は、ひび割れの発生を許容しない補強を想定した場合には線形関係となるため、条件が異なる場合に関しても同図から換算して類推が可能である。なお、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いことを付記しておく。

また通常、レール締結装置も調整能力を有している。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。

図-14 に、鉄道 PC 桁における実剛性と設計剛性の関係を示す⁶⁾。実橋では、図に示すように軌道等の非構造部材の影響で上反りが緩和されるため、計測等を併用して精度管理を行うのがよい。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

- (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) 列車荷重による PC 桁のたわみは、必ずしも桁の上反りを効果的に緩和しない。
- (3) 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。
- (4) 試算の結果、当初の有効プレストレス力の 10%を外

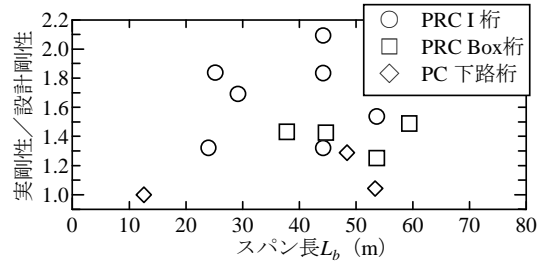


図-14 桁の実剛性と設計剛性の関係

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
- 4) 市川篤司：橋梁の主桁たわみ制限の適用に関する諸問題，鉄道総研報告，Vol.8, No.8, pp.13-18, 1994
- 5) 村田清満：鋼桁部材間の温度差が列車走行に与える影響（東北新幹線沼辺橋梁），構造物設計資料，No.81, pp.24-30, 1985
- 6) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No.724/I-62, pp.83-102, 2003
- 7) 曾我部正道，古川敦，下村隆行，飯田忠史，松本信之，涌井一：列車の高速化に対応した構造物の変位制限，鉄道総研報告，Vol.18, No.8, pp.41-46, 2004