

論文 列車通過時のコンクリート桁上の電柱動的応答評価

松岡 弘大*1・常本 瑞樹*2・徳永 宗正*3

要旨： 高速鉄道のコンクリート桁上の電柱振動やこれに起因する電車線設備の不具合が報告されている。しかし、列車通過時の桁上電柱の振動性状はこれまで断片的にしか検討されていない。本研究では、有限要素法による桁と電柱の連成応答解析モデルを構築し、現地測定結果との比較により、その計算精度を検証した。また、提案モデルにより桁支間長、電柱建植位置、電柱種別などをパラメータに解析を行った結果、走行列車の加振周期と電柱の共振に加え、桁の共振が重複した場合、電柱に顕著な動的応答増幅が生じること、桁端の電柱の線路方向振動が桁中央の電柱の線路直角方向振動よりも大きく卓越することを明らかにした。

キーワード： 電柱振動, 共振現象, 高速鉄道, 動的解析

1. はじめに

近年の列車速度の急速な高速化と桁の低剛性化に伴い、一部の鉄道橋で大きな動的応答が生じる共振現象が観測されている^{1),2)}。共振による桁の大振幅振動は、桁本体だけでなく、電柱などの桁上の設備にも大きく影響する。実際に、共振橋梁上での電車線設備の不具合も報告されている^{3),4)}。これまで、桁単体、もしくは、電柱単体では、列車通過時の振動に関して数多くの検討が実施され、振動性状の解明^{5),6)}や対策工⁷⁾、電柱制振装置の提案⁸⁾が行われてきた。しかし、鉄道橋の振動に起因した電柱の振動性状の理解には、桁-電柱の全体系(図-1)の振動性状が重要となる。これに関して、桁-電柱連成応答解析モデルによる検討⁹⁾、現地計測による考察²⁾、などが実施され、桁端に建植された電柱では線路方向の振動が、桁中央に建植された電柱では線路直角方向の振動がそれぞれ卓越することなどが明らかにされてきた。一方で、列車通過時の大きな振動が生じる電柱を管理していくうえで、様々な桁・電柱の条件が存在する実路線の中で、どのような条件で電柱振動が卓越するかを明らかにする必要がある。したがって、実測値との比較により計算精度を検証したうえで、桁-電柱の連成応答解析モデルによるパラメトリックな解析により、主要な影響成分を分析する必要がある。しかしながら、これまでには実測、解析ともに断片的な検討しか実施されてこなかった。

以上を踏まえ、本研究では列車通過時における橋梁上の電柱振動が卓越する条件を明らかにすることを目的とし、以下の検討を実施した。

- ・桁-電柱の連成応答解析モデルの構築
- ・現地計測による解析モデルの精度検証
- ・解析による桁支間長、電柱種別、電柱位置の影響分析

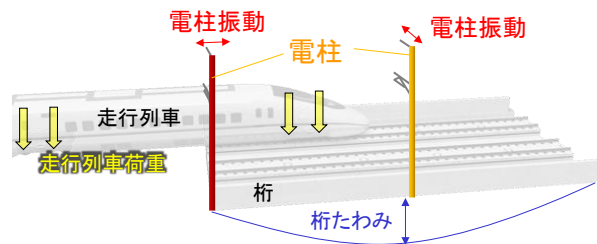


図-1 鉄道橋上に建植された電柱の概要

表-1 測定対象橋梁の諸元一覧

桁形式	H 鋼埋込みコンクリート I 桁
支間長 L_b	21.1 [m]
桁高	1.25 [m]
断面二次モーメント	1.48 [m ⁴]
単位長質量	15200 [kg/m]
計算固有振動数	4.9 [Hz]

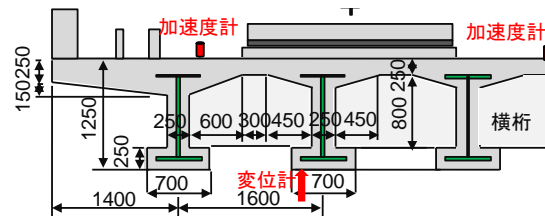


図-2 測定対象橋梁の断面図

2. 検討方法

2.1 現地計測の方法

(1) 対象橋梁および電柱

桁-電柱の連成応答解析モデルの精度検証を目的に、列車通過時の桁および電柱応答を測定した。

表-1 および図-2 に対象としたコンクリート桁の諸元および断面図を示す。対象は高速鉄道用の複線 6 主桁形式の H 鋼埋込みコンクリート桁(支間長 $L_b = 21.1\text{m}$)である。なお、当該橋梁には起点側桁端部に電柱が建植されている。桁端に建植された電柱は、高さ 10m の標準的な鋼管柱である。

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 電力技術研究部 電車線構造 主任研究員 修士(工学) (非会員)

*3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 副主任研究員 博士(工学) (非会員)

表-2 測定対象電柱の諸元一覧

電柱形式	鋼管柱, STK540-406.4-11-6.4 (コンクリート柱, 11-40-N13B)
長さ	10 (10) [m] (根入れ 1m)
曲げ剛性	3.31 (4.49) [Nm ²]
単位長質量	63.1 (189.5) [kg/m]
計算固有振動数	3.3 (2.3) [Hz]
ちょう架方式	高速シンプル (ヘビーコンパウンド)

()内はコンクリート柱

表-3 電柱添加物の諸元一覧

	質量[kg]	高さ[m]	水平距離[m]
き電線腕金	26.0 (26.0)	9.8 (9.8)	0.91 (0.91)
架空地線 (GW)	25.3 (22.3)	10.8 (10.8)	0.29 (0.13)
保護線 (PW)	24.0 (24.0)	9.8 (9.8)	0.60 (0.60)
き電線 (AF)	69.0 (69.0)	9.8 (9.8)	1.82 (1.82)
ちょう架線	68.8 (72.5)	5.95 (6.42)	3.48 (4.45)
可動ブラケット	160.0 (150.0)	5.55 (5.67)	1.74 (2.23)
トロリ線	49.6 (144.2*)	5.95 (6.42)	3.48 (4.45)

*はトロリ線+補助ちょう架線, ()内はベビーコンパウンド

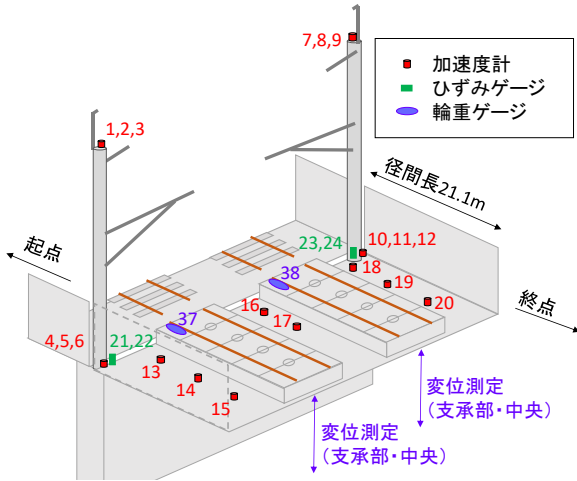


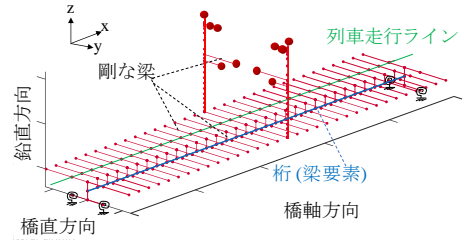
図-3 センサ配置

表-2 に対象としたコンクリート桁上の電柱諸元一覧を示す。また、表-3 に当該電柱に設置された架線などの添加物の諸元を示す。文献¹⁰⁾に従い計算した添加物が付いた電柱の固有振動数は、約 3.3Hz である。

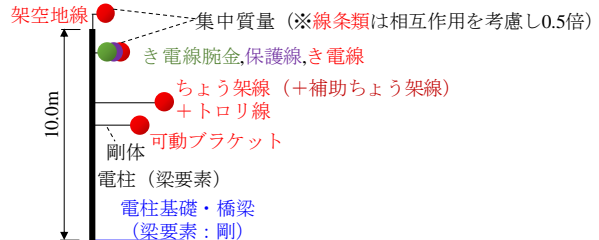
(2) 測定および分析方法

図-3 に測定機器の配置を示す。対象橋梁および電柱の振動性状を把握するため、加速度計、ひずみゲージ、変位計、輪重ゲージを桁と電柱に設置した。モード同定を目的に、加速度計は橋梁床板上面に 8 点、電柱基部および天端に 3 点ずつ配置した。変位計は支承位置に上下線 2 点、桁 1/3 位置に上下線 2 点の計 4 点を測定した。その他、列車からの入力荷重を把握するため、輪重ゲージを上下レールにそれぞれ設置し、通過列車の輪重を測定した。列車速度は概ね 210 から 260km/h、合計 79 本の列車通過時の応答を上述のセンサにより測定した。

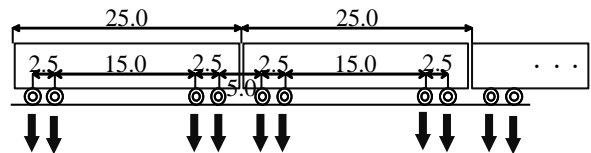
得られた加速度応答から橋梁および電柱の振動モードの同定を行った。列車通過後の残留波形を自由振動と



(a) 全体モデル



(b) 電柱モデル



(c) 荷重モデル

図-4 解析モデル

仮定し、多点計測に対応可能な ERA 法¹¹⁾により橋梁および電柱の振動モードをそれぞれ同定した。ERA 法は構造物を線形時不変系システムと仮定し、特性行列を介して固有振動数、モード減衰比、振動モード形を同定する。手法および適用手順に関する詳細は文献¹¹⁾を参照されたい。なお、ERA 法の自由度は 20 とした。

2.2 数値解析の方法

(1) 基本モデル

図-4 に桁-電柱連成応答解析モデルの一例を示す。桁および電柱の主構造は梁要素でそれぞれモデル化した。桁と電柱は剛な梁要素で接続した。桁の支承はバネ要素によりモデル化した。また、架線等の電柱添加物は水平および鉛直位置での集中質量とし、電柱まで剛な梁要素により接続した。

桁諸元は単位長質量、曲げ剛性およびねじり剛性により設定される。再現解析では対象橋梁の測定値に合うよう修正した曲げ剛性を、パラメトリック解析で一般的な高速鉄道用コンクリート桁の諸元を、それぞれ導入した。

標準的な高さ 10m の電柱を対象とし、鋼管柱およびコンクリート柱の二種類を設定可能とした。また、鋼管柱では高速シンプル架線、コンクリート柱ではヘビーコンパウンド架線の各架線方式に対応した添加物が集中質量としてモデル化されるよう設定した。コンクリート柱およびヘビーコンパウンド架線の諸元は表-2 および表-3 中の()内に示す。電柱位置は、桁端、桁 L/3 地点、桁中央の 3 種類とした。なお、き電線や電車線などの電線は

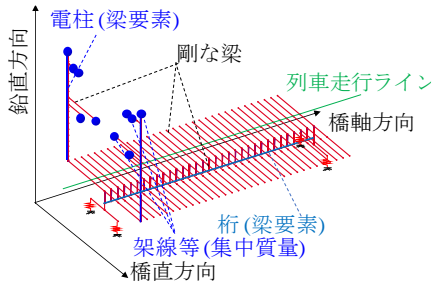


図-5 再現解析モデル

各設備にピン結合されているがこれを剛結合でモデル化したため、文献¹⁰⁾に従い電線質量は半分のみを考慮した。

列車は任意速度の移動荷重列でモデル化した。再現解析では、12両分、軸重は概ね実測値となる130kNとした。パラメトリック解析では、最大編成を見込んで16両分、軸重は設計値170kNとした。移動荷重列は桁中心から2.3m位置の走行ライン上に作用させた。

動的解析は、車両を非振動定荷重列と見なす、線路構造物の汎用構造解析プログラムDIARIST (Dynamic and Impact Analysis for Railway Structure) を使用した。なお、考慮したモード次数は、桁および電柱の主要な低次モードが含まれるよう、すべてのケースで40次とし、各モードのモード減衰は2%とした。

(2) 再現解析モデル

図-5に再現解析モデルを示す。現地測定で対象とした桁および電柱に合わせ、支間長21.1mとした。また、高さ10mの鋼管柱を桁端に配置した。電柱および添加物の諸元は表-2および表-3に示す通りとした。桁剛性は、列車通過時のひび割れ等の影響を加味するため、現地測定で得られた240km/h走行時の最大たわみに合うよう、曲げ剛性を約20%低減させた。列車速度は、現地測定と同じ210~260km/hとし、1km/hごとに解析を実施した。得られた桁中央の変位応答、および電柱天端の加速度応答を測定値と比較した。

(3) パラメトリック解析モデル

再現解析により検証された解析モデルを用いて以下のパラメトリック解析を実施した。

表-4に検討ケースの一覧を示す。走行速度は100km/hから400km/h(1km/h刻み)とした。桁の単位長質量は既往研究⁹⁾を参考に200kN/mとし、固有振動数(80L_b^{-0.8}: L_b ≤ 20m, 55L_b^{-0.8}: L_b > 20m)から桁剛性を逆算して設定した。また、桁ねじり剛性は桁剛性と荷重分担率の既存の調査結果⁹⁾に基づき荷重分担率β₁=L_b^{-0.15}となるよう設定した。支間長L_bは5mから50m(5m刻み)とした。鋼管柱およびコンクリート柱がそれぞれ桁端、L_b/3、径間中央に建植された場合を対象とした。これらの解析結果に基づき、基本的な桁-電柱系の基本的な振動性状とともに、電柱種別、建植位置などの影響を検討した。

表-4 解析ケース一覧

電柱種別	電柱位置	桁振動数 [Hz]	ねじり剛性	径間長 [m]	列車速度 [km/h]
鋼管柱	桁端 L _b /3	80L _b ^{-0.8} : L _b ≤ 20m	β ₁ = L _b ^{-0.15} 相当	5 - 50 5m刻み	100 - 400 1km/h刻み
コンクリート柱	桁端 L _b /3 桁中央	55L _b ^{-0.8} : L _b > 20m			

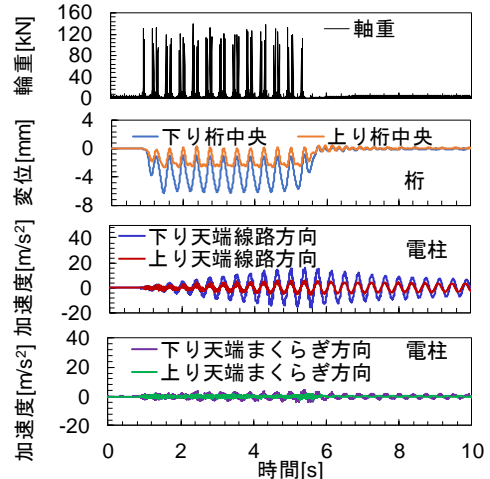


図-6 測定波形の例(下り列車, 240km/h)

表-5 固有振動数およびモード減衰比の同定結果

モード	固有振動数 [Hz]	変動係数* [%]	モード減衰比 [%]	変動係数* [%]
電柱橋軸1次	2.67 (2.74)	0.5	1.8 (2.0)	60.0
電柱橋直1次	2.64 (2.61)	1.9	3.2 (2.0)	89.7
桁たわみ1次	5.34 (4.70)	2.9	2.3 (2.0)	49.2
桁ねじり1次	6.61 (6.67)	3.0	2.7 (2.0)	53.0

*変動係数は(標準偏差)/(平均値)
()内は解析結果

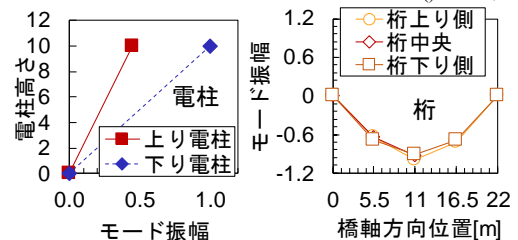


図-7 振動モード形の同定結果

3. 検討結果

3.1 現地計測結果

図-6に列車が下り方向に240km/hで走行した際の測定波形の例を示す。列車通過に伴い、桁たわみおよび桁ねじり変形が生じる。また、線路方向の電柱天端加速度は列車通過に伴い増大する共振状態にある。まくらぎ方向(線路直角方向)の電柱天端加速度は、線路方向に比べて十分に小さく、桁端建植された電柱で線路方向の振動が卓越することがわかる。

表-5に列車通過後の5秒間の残存波形を切り出し、ERA法で同定した固有振動数を、図-7に同じく同定し

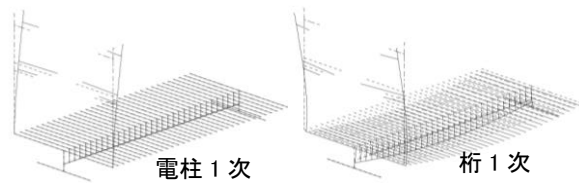


図-8 振動モード形の解析結果

たモード形を示す。同定された固有振動数は、電柱の線路方向および線路直角方向モードがともに 2.6 Hz 程度、桁たわみ 1 次モードが 5.3 Hz 程度であった。変動係数は数%程度であり信頼性は高いものと考えられる。共振速度は、電柱が 240 km/h 程度で 1 次共振となっている。

3.2 再現解析結果

(1) モード特性の比較

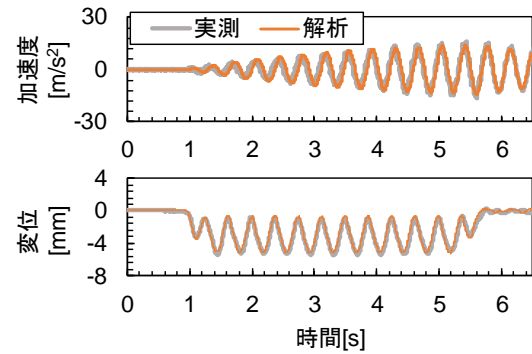
表-5 中の()に解析モデルの固有値解析結果を示す。また、図-8 に解析モデルの固有値解析で得られたモード形を示す。電柱および桁ともに振動モード形は同定結果とよく一致する。また、電柱の固有振動数は、実測と解析で良好に一致する。したがって、電柱の解析モデルで導入した、線条類との相互作用の簡易なモデル化(架線類の質量の半分のみを考慮)¹⁰⁾が概ね妥当であることを確認できる。一方、桁の解析モデルの 1 次たわみモードの固有振動数は実測値よりも若干低い。解析モデルの桁剛性は測定されたたわみ最大値に合わせて設定しており、列車質量¹²⁾やひび割れ⁹⁾などの影響が加味されている。しかし、実測固有振動数は列車通過後の小振幅時の波形に基づくため、解析と実測で列車質量やひび割れ開口状態が異なり、このような差が生じたと考えられる。なお、ひび割れ開口などによる荷重時剛性の低下は、本研究の範疇を超えるため、別の機会に発表することとする。

(2) 応答値の比較

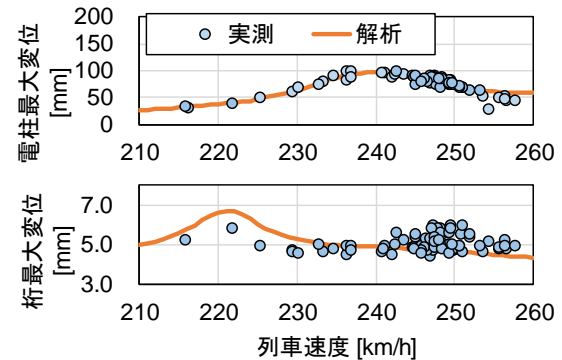
図-9(a)に実測と解析の比較結果として、列車が下り方向に 240 km/h で走行した際の電柱天端の線路方向加速度、および桁中央の鉛直方向変位の例を示す。桁の最大変位が合うよう桁の曲げ剛性を修正することで、電柱の加速度波形および桁の変位波形の解析値は、実測値と精度よく一致することを確認できる。

図-9(b)に実測値による解析結果の検証例として、様々な速度で列車が下り方向に走行した場合の、電柱天端の線路方向の最大変位、および桁中央の鉛直方向下向き最大変位の比較を示す。なお、電柱天端変位の測定値は加速度波形の二階積分により推定した。

電柱天端変位の解析結果は実測値と良好に一致する。また実測値のばらつきが多少大きいですが、桁中央変位の解析結果も、概ね実測値と同じ傾向を示す。なお、電柱に比べて最大変位が小さいため、桁中央変位の測定ではノイズの影響が大きかったと考えられる。また、電柱天端



(a) 測定波形の比較 (240km/h)



(b) 最大値の比較

図-9 実測値との比較による解析モデルの検証

変位は、約 240km/h で共振により最大値を示す。桁たわみは 220km/h 程度で極大値を示すが、当該速度での電柱天端変位は共振時の半分以下である。したがって、桁のたわみ量よりも電柱共振の有無の方が電柱天端変位に大きく影響することがわかる。

3.3 パラメトリック解析結果

桁-電柱連成応答解析モデルにより、各種因子の影響を検討した。なお、最大を見込んで、移動荷重列車は、車両数 16 両、軸重 170kN としたため、基本的に実路線での測定値よりも大きいことに留意されたい。

(1) 桁支間長の影響

図-10 に支間長 5~50m の桁の列車通過時の最大応答値(桁中央最大たわみ、および桁端最大たわみ角)と列車速度の関係を示す。支間長 25m 以上で 1 次共振によるピークを確認できる。走行車両長の定数倍となる 25m および 50m の桁で 1 次共振時の最大たわみが大きい。また、桁端に位置する電柱への入力となる桁端たわみ角は、たわみと比較して支間長が短い場合に大きい傾向にある。

図-11 に桁端に位置する鋼管柱の線路方向最大変位を示す。桁の支間長に関わらず、電柱の固有振動数と列車の加振周期から決まる電柱 1 次共振速度で電柱振動が卓越する。支間長 25m 以上の桁では桁の 1 次共振時に電柱天端変位が若干増大するが、電柱 1 次共振時の方が最大変位は大きい。支間長 45m の場合、桁の 1 次共振と電柱の 1 次共振が重複し、電柱天端の最大変位が大きく増

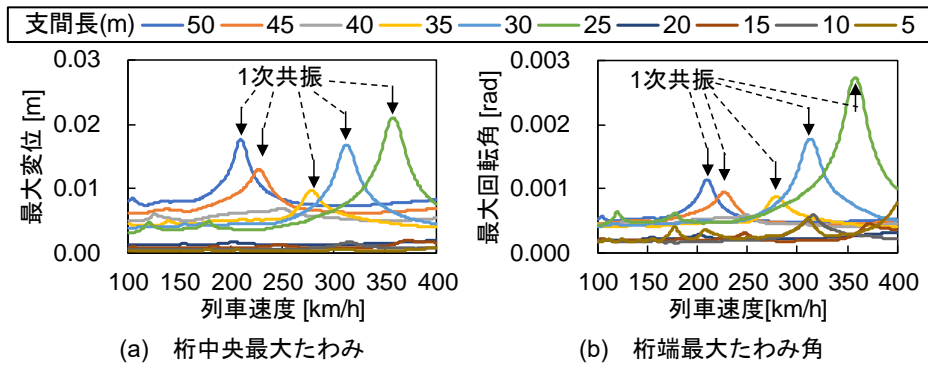


図-10 列車通過時における各支間長での桁応答

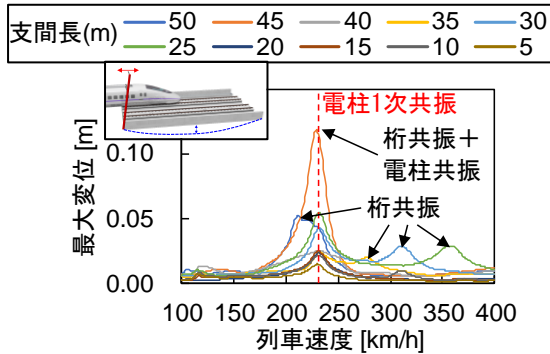


図-11 列車通過時における電柱天端最大変位
(鋼管柱, 桁端, 線路方向)

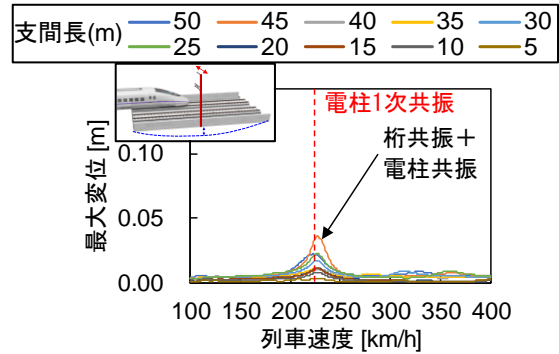


図-12 列車通過時における電柱天端最大変位
(鋼管柱, 桁中央, 線路直角方向)

大する。支間長 50m の桁でも桁の 1 次共振速度と電柱の 1 次共振速度が近接しており、電柱天端の最大変位が増大する傾向にある。共振速度は、桁および電柱の固有振動数により決まる。したがって、桁上電柱振動の卓越には、電柱共振とともに桁共振との重複、すなわち、電柱と桁の固有振動数の比が大きく影響することがわかる。

(2) 建植位置の影響

桁中央に位置する電柱への主な入力力は桁のたわみに伴う鉛直振動である。添加物が内側に設置されている関係で、電柱の重心は設置位置よりも内側にある。したがって、鉛直加振により線路直角振動が励起される。

図-12 に桁中央に位置する鋼管柱の線路直角方向最大変位を示す。なお、桁中央電柱の線路方向最大変位はいずれの支間長でも片側 10mm 以下であった。また、桁中央電柱の鉛直変位は桁中央たわみ量と同じである。桁端の場合と同じように、電柱の 1 次共振速度において電柱天端の最大変位が増大する。しかし、桁の 1 次共振と重複する支間長 45m の場合であっても、共振時の電柱天端の最大変位は片側 35mm 程度と、桁端電柱の半分以下である。したがって、同じ桁であれば桁端よりも桁中央に電柱を設置した方が、電柱振動を小さく抑えることができる可能性がある。

(3) 電柱種別の影響

図-13 に桁端に位置するコンクリート柱の線路方向最大変位を示す。鋼管柱の場合と同様に、電柱の 1 次共

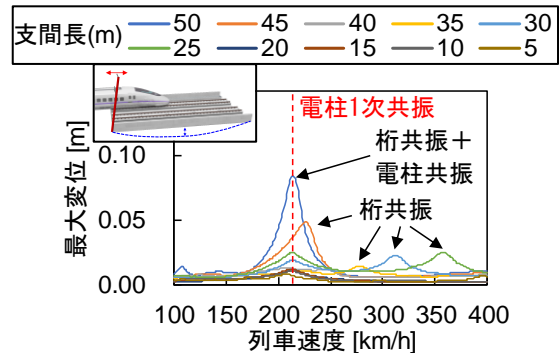


図-13 列車通過時における電柱天端最大変位
(コンクリート柱, 桁端, 線路方向)

振速度で電柱振動が卓越する。コンクリート柱の 1 次固有振動数は、2.3Hz 程度であり、鋼管柱 (約 2.7Hz) よりも低い。電柱の共振速度は 215km/h 程度である。鋼管柱では支間長 45m で桁共振と電柱共振が重複したが、コンクリート柱ではより固有振動数の低い支間長 50m の桁と共振が重複する。なお、鋼管柱と比較すると、コンクリート柱の方が、共振時の最大振幅自体は小さい。コンクリート柱は曲げ剛性が鋼管柱よりも若干大きいことに加え、質量が鋼管柱よりも 3 倍程度大きい。このため、質量で基準化されたモード外力が鋼管柱に比べ小さくなり、最大振幅が小さくなる。

4. おわりに

本研究では、列車の高速時におけるコンクリート桁上

の電柱振動発生要因，および電柱振動が増大する条件を明らかにすることを目的に，桁および電柱に着目した現地計測を実施するとともに，桁－電柱連成解析モデルを構築し，現地測定による解析精度の検証およびパラメトリック解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 桁および電柱を梁要素で，電柱への架線等の添加物を集中質量でそれぞれモデル化し，桁支間長や電柱種別，電柱位置などの影響を容易に分析可能な桁－電柱連成応答解析モデルを構築した。
- (2) 現地試験で得られた電柱および桁のモード特性，時系列応答，最大変位と解析値を比較することで，桁－電柱の連成応答解析モデルの解析精度を検証した結果，桁－電柱の連成応答解析モデルは桁上電柱の最大変位を評価するのに十分な精度を有することを確認した。
- (3) 桁－電柱の連成応答解析結果から，電柱天端の最大変位は支間長に依らず概ね電柱の1次共振時に最大変位が生じること，桁の共振が電柱共振と重複する場合に天端変位が急激に増大することを明らかにした。
- (4) 桁－電柱の連成応答解析結果から，桁中央よりも桁端の電柱で大きい最大変位が生じること，鋼管柱はコンクリート柱と比較して大きい電柱天端変位が生じることを明らかにした。

今後，本研究で得られた知見を既設の桁上電柱の維持管理および新設の桁上電柱の設計に活用していくため，それぞれ以下の点についてさらに検討を進めていく。

維持管理では，既存の桁の固有振動数測定結果を支間長や桁種別により整理するとともに，標準的な電柱の固有振動数との比較により，注意すべき橋梁の支間長や種別の同定を行っている。また，電柱振動時の電線損傷に関しては対策手法¹³⁾がすでに提案され，地上からの画像計測手法¹⁴⁾や車上からの共振橋梁の検知手法¹⁵⁾の開発および適用性の検討を進めている。設計においては，より包括的な桁－電柱のパラメトリック解析により，設計上の留意が必要な桁や電柱設置条件を明らかにしたうえで，現行の変位制限¹⁶⁾との比較，設計で利用可能な簡易計算法や限界値の設定を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 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，pp. 83-102，2003。
- 2) 藤江幸人，井口重信，松田芳範，小林薫：新幹線走行に伴う PRC 単純桁の振動について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 3，pp. 1801-1086，2008。

- 3) 米倉祐司，西本朋幸：MT コネクタの破断対策の検証について，第 28 回鉄道電気テクニカルフォーラム論文集，pp. 113~116，2015
- 4) 粕谷英利：北陸新幹線振動箇所における電化柱の影響について，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-16-23，pp. 13~18，2016。
- 5) 千頭啓司，杉田清隆，築嶋大輔：新幹線 PRC 桁の共振現象に関する調査分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 2，pp. 443-448，2018。
- 6) 中須賀淳貴，水谷司，山本悠人，内田雅人，蘇迪，長山智則，藤野陽三：新幹線高架橋 PRC 桁の大振幅振動メカニズムの解明と構造特性の長期トレンドの分析，構造工学論文集，Vol. 62A，pp. 42-49，2016。
- 7) 松岡弘大，徳永宗正，築嶋大輔，後藤恵一：共振 PRC 桁の支点追加補強時における動的応答評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41，No. 2，pp. 1219-1224，2019。
- 8) 常本瑞樹，網干光雄，清水政利，久須美俊一：電車線柱の剛性増加による振動抑制の検討，平成 21 年電気学会産業応用部門大会講演論文集，No. III，pp. 157-158，2009。
- 9) 松岡弘大，常本瑞樹，曾我部正道：列車通過時の橋梁上電柱振動に関する解析的検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol. 22，pp. 207-2014，2018。
- 10) 電力設備耐震性調査委員会：電車線路設備耐震設計指針（案）・同解説及びその適用例，1997。
- 11) K. Matsuoka, A. Collina, C. Somaschini, M. Sogabe: Influence of local deck vibrations on the evaluation of the maximum acceleration of a steel-concrete composite bridge for a high-speed railway, *Engineering Structures*, Vol. 200, 109736, 2019.
- 12) K. Matsuoka, K. Kaito, M. Sogabe: Bayesian time-frequency analysis of the vehicle-bridge dynamic interaction effect on simple-supported resonant railway bridges, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 135, 106373, 2020.
- 13) 常本瑞樹，佐藤修平，清水政利：電柱振動時における線条応力の評価と低減対策検討，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム，No. S7-1-5，pp. 268-271，2019。
- 14) 松岡弘大，上半文昭，日下博也，今川太郎，野田晃浩：ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol. 74，No. 2，pp. I_715-I_726，2018。
- 15) 松岡弘大，渡辺勉，上半文昭：車上計測による共振橋梁の検知手法，鉄道総研報告，Vol. 33，No. 8，2019。
- 16) 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。