

論文 広幅員の鉄道用 PRC 単純 T 形 15 主桁の列車高速走行時の動的挙動検討

小林 薫^{*1}・伊藤 隼人^{*2}・小林 寿子^{*3}

要旨：本論文は、スパンが 26.9m、桁高 1.4m、幅員が 20.1m の新幹線用の PRC 単純 T 形 15 主桁を対象に列車高速走行時の動的挙動検討を行ったものである。本 PRC 桁は、駅構内に設置されており、4 線を支持していることから、鉄道橋としては広幅員で桁高スパン比が 1/19.2 の比較的桁高の低い構造となっている。本検討では、本 PRC 桁を 3 次元の構造モデル化し、簡易な列車走行解析から動的挙動検討を行った。その結果、1 次共振速度が 330km/h であること、共振速度時の変形挙動として、桁のたわみモードとねじりモードが連成し、全体的にたわみながらも下り線側最外縁の桁のたわみが大きくなることがわかった。

キーワード：列車走行解析、PRC 桁、共振速度

1. はじめに

本検討では、駅構内に位置し、4 線分の線路が配置されたことで桁の幅員が 20.1m となり、主桁本数も 15 本と新幹線の橋桁としては主桁本数の多い PRC 単純 T 形 15 主桁を取り上げる。

検討対象桁は、スパンが 26.9m、桁高が 1.4m となっており、桁高スパン比が 1/19.2 程度と本構造形式においては比較的桁高が低い構造となっている。本 PRC 桁では、将来の新幹線の速度向上に向けて、列車の高速走行時の影響検討を行うことになった。

走行列車と構造物との動的相互作用に関する研究は、比較的古くから行われている。最近では曾我部ら¹⁾による詳細な検討が行われており、研究成果は 2006 年制定の鉄道構造物等設計標準・変位制限（以下、「変位制限標準」という）²⁾ に大きく貢献している。曾我部らの研究によると、無次元化スパン (L_b/L_v) (L_b ：部材のスパン長、 L_v ：荷重間隔) が 1.0 に近い場合、動的応答倍率が大きくなることが示されている。荷重間隔 L_v を新幹線車両長である 25.0m とすれば、本 PRC 桁の無次元スパン (L_b/L_v) が 1.08 で、動的応答倍率が大きくなる桁構造であると推測される。本 PRC 桁の構造的な特徴である幅員が広いことから、ねじりなどの 3 次元動的挙動の影響も無視できないと考えられる。

本検討対象 PRC 桁には、スパン中央に鋼製門型電化柱が設備されている。鋼製門型電化柱は、走行列車への電力供給を行うための重要な設備である。鋼製門型電化柱の動的挙動は、列車走行時の桁の動的挙動が加振力として作用する。既往の報告^{3) 4)} では、列車の高速走行時の加振周波数や桁の挙動により、電化柱の応答が大きくなると報告されている。列車高速走行時では、桁だけでな

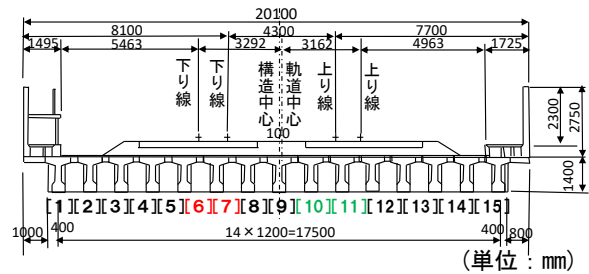


図-1 検討対象 PRC 桁スパン中央の断面形状



写真-1 検討対象 PRC 桁の全景

く鋼製門型電化柱の動的挙動を把握することも重要と考えられる。

本検討では、shell 要素を用いた 3 次元構造解析モデルによる簡易な列車走行解析から、列車の高速走行時における広幅員の鉄道用 PRC 単純 T 形 15 主桁および鋼製門型電化柱の動的挙動に着目した検討を行ったので報告する。

2. 検討対象 PRC 単純 T 形 15 主桁の構造概要

図-1 に、検討対象 PRC 単純 T 形 15 主桁のスパン中央位置の断面形状を示す。写真-1 に、検討対象 PRC 桁の全景を示す。表-1 に、設計諸元を示す。

本 PRC 桁は、スパンは 26.9m、桁高 1.4m、桁の幅員が

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 上席研究員 博(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 (正会員)

20.1m, 右 70 度の斜角桁となっている。桁高とスパンの比で表される桁高スパン比は, 1/19.2 となっている。主桁本数によっても違いがあるが, 同種の桁構造の桁高スパン比が 1/12~1/15 程度であるのと比較すると, 検討対象桁は桁高が小さい構造となっている。

本 PRC 桁は, 駅構内に設置され, 上下線の本線と引き込み線の副本線の 4 線分の軌道を支持している。新幹線の一般的な複線 PRC 桁の幅員が 11m 程度に対して, 本 PRC 桁の幅員が 20.1m で, 鉄道橋としては広幅員となっている。主桁中心位置から下り線側端部までの幅員が上り線幅員より 200mm 広がっている。スパン中央には, 鋼管柱とトラス梁による鋼製門型電化柱が設備されている。

本 PRC 桁は, 中間横桁についても特徴を有している。一般的な PRC 桁の中間横桁は, 梁幅が 0.3~0.4m 程度で概ねスパンを 4 等分するような位置に配置される。本 PRC 桁では, スパン中央に梁幅が 1.0m の中間横桁が一家所のみの配置となっている。鋼製門型電化柱の受梁は, 中間横桁が主桁外側に延長した状態で設置されている。防音壁の基部は, H 鋼を巻き込んだ場所打ちの RC 壁となっており, その上は H 鋼を支柱とし, H 鋼間に穴あき PC 版を落とし込んだ構造となっている。

3. 簡易列車走行解析による検討概要

3.1 解析手法の概要

簡易な列車走行解析は, 参考文献 5) で示されている既往の研究と同様な方法で行った。

簡易な列車走行解析は, 走行列車の荷重列モデルを移動荷重として, 構造モデル上を移動させる方法で行う。走行列車, 構造物間の動的相互作用の影響は, サブストラクチャー法による移動荷重の解析を行うことで考慮可能とした。サブストラクチャー法による簡易な列車走行解析は, 列車系と構造物系を分離して各々の系を個別の運動方程式で定式化する。列車系と構造物系とは, 適合条件を元に自由度間の外力と強制変位加振で連結し, 各々の系に対する相互作用として計算する。図-2 に, 本検討に用いた簡易な列車走行解析手法の概要を示す。

3.2 解析モデルの概要

(1) 桁構造部の解析モデル

図-3 に, 本検討に用いた解析モデルを示す。桁構造部は, shell 要素を用いて, 主桁, スラブ, 防音壁などを 3 次元でモデル化した。防音壁の穴あき PC 版については, 重ねて配置されているので, 桁剛性への寄与が小さいと考え, モデル化を行わなかった。

主桁部の shell 要素は, 図-4 に示すように主桁各部の厚さに応じた, shell 要素を設定した。鋼管門型電化柱は, Beam 要素とし, 鋼材の弾性係数, 柱部の鋼管寸法 (ϕ

表-1 検討対象 PRC 桁の設計諸元

構造形式	ポストテンションPRC単純T形桁		
桁長	27.9m(スパン26.9m)		
列車荷重	P-17, N-16		
設計衝撃係数	単線載荷 0.600(終局時)		
	複線載荷 0.519(終局時)		
曲線半径	直線		
斜角	70° 00' 00''		
軌道種別	スラブ軌道		
コンクリートの品質	主桁	桁間・横桁	張出し床版
設計基準強度(N/mm ²)	40	30	30

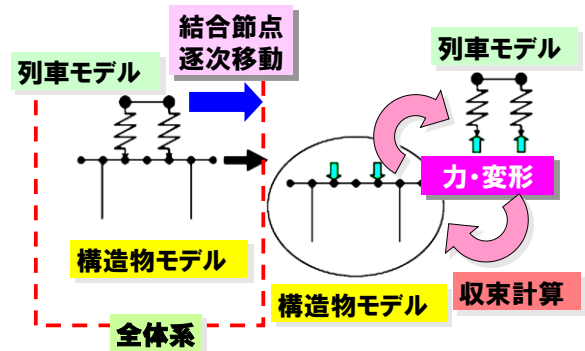


図-2 簡易な列車走行解析手法の概要

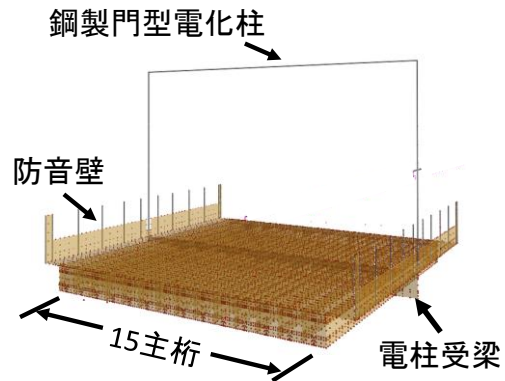


図-3 検討に用いた解析モデル

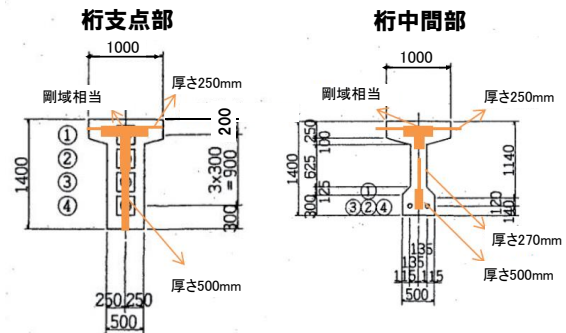


図-4 桁構造部のモデル諸元の設定概要

400×7(STK570)), トラス構造の梁部材の上弦材と下弦材を Beam 要素に換算した断面二次モーメントを設定した。

主桁上の軌道などの質量は, 主桁間隔に応じた質量を計算し, 対応するそれぞれの主桁に集中して配置した。

(2) 列車モデル

本解析で使用した走行列車モデルの概要を図-5に示す。各車両は、車体と台車そして車軸をモデル化した節点および梁要素と、車体・台車間、台車・車軸間の振動特性と減衰特性をそれぞれモデル化したバネ要素、ダンパー要素で構成した。各車両間は上下方向のバネ要素、ダンパー要素で接続した。列車モデルの諸元は、代表的な新幹線車両から定めた。

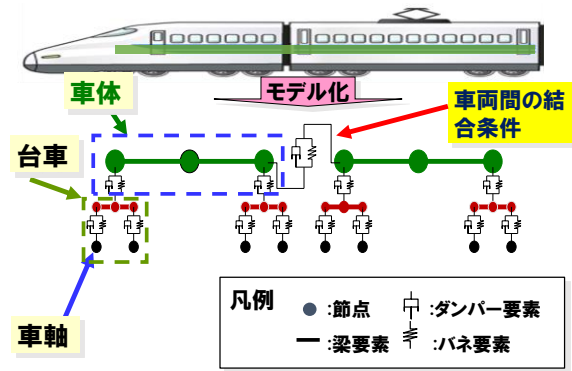


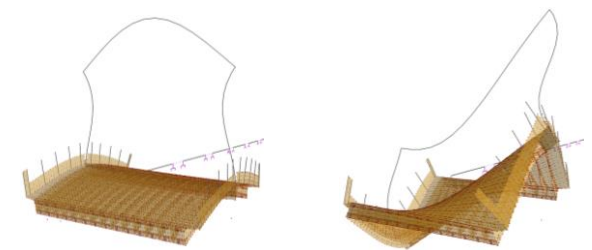
図-5 走行列車モデルの概要

4. 解析結果の概要

4.1 固有値解析結果

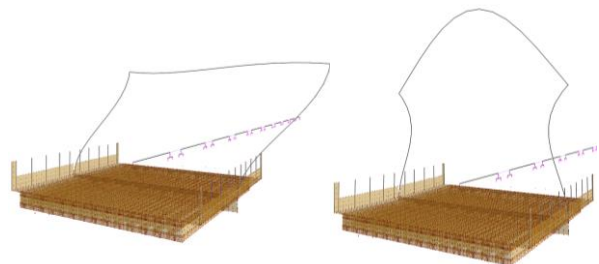
固有値解析を全体系の固有モードとして、20次までの解析を行った。図-6(a)は、桁構造部に着目した固有モードを、図-6(b)は、鋼製門型電化柱横梁に着目した固有モードをそれぞれ示す。

固有値解析結果としては、全体系1次～3次の固有モードが鋼製門型電化柱単独の変形モードであった。全体系4次モードは、桁のたわみ方向の変形が卓越する桁構造部自体の1次固有モードとなっていた。鋼製門型電化柱の梁部材では、鉛直方向の変形モードも卓越しており、桁のたわみと鋼製門型電化柱梁部材の鉛直方向の変形と連成する固有モードとなっていた。全体系4次モード(桁の1次モード)の固有振動数は3.786Hzであった。全体系5次モードは、鋼製電化柱横梁鉛直方向の変形のみモードで固有振動数は4.617Hzであった。全体系6次モードは、桁構造部のねじり方向の変形が卓越する固有モードで、桁構造部の2次モードとなっており、固有振動数は5.289Hzであった。全体系7次モードは、鋼製門型電化柱横梁の線路方向のみの変形モードで固有振動数は8.161Hzであった。



i) 桁 1次モード^{*} f=3.786Hz ii) 桁 2次モード^{*} f=5.289Hz
(全体4次モード) (全体6次モード)

(a) 桁構造部



i) 電柱梁 2次モード^{*} ii) 電柱梁 4次モード^{*}
f=4.617Hz (全体2次モード) f=8.161Hz (全体5次モード)

(b) 鋼製門型電化柱横梁

図-6 固有値解析結果の主な固有モード

全体8次モード(桁構造部の3次モード)は、桁構造部の構造中心が下側にたわむと同時にスパン1/4が腹となるような複雑な変形モードを示した。全体系の9次(固有振動数で12.854Hz)～20次モード(固有振動数で19.222Hz)は、桁構造部、防音壁、鋼製門型電化柱がそれぞれ連成するような変形モードを示した。

本PRC桁では、列車試運転時に実施したたわみ測定から、実固有振動数の検討が行われている。たわみの測定波形から、列車通過後の自由振動波形を抜き出し、FFT解析から卓越する振動数を同定した。その結果、3.784Hzとなり、1次の実測固有振動数となっている。本検討に用いた解析モデルの1次の固有振動数が3.786Hzであることから、固有値解析結果は、比較的精度よく、実測値の1次固有振動数を評価していた。

4.2 列車走行解析結果の概要

(1) 低速走行時の実測たわみ値との比較

本PRC桁では、開業前の列車試運転時に桁のたわみ測定が行われた。桁たわみ測定時の列車速度は、時速60km

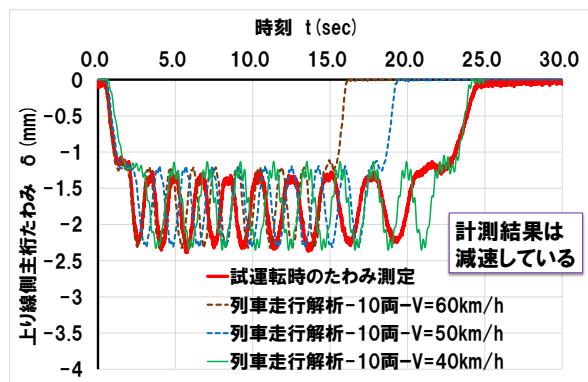


図-7 低速時の実測たわみと解析結果の比較

の比較的低速となっている。解析モデルの妥当性検証として、低速時ではあるが実測たわみとの比較を行った。図-7に、実測たわみと解析結果の比較を示す。実測た

わみの測定では、時速 60km と記録されているが、時刻 10 秒以降のたわみ波形の周期間隔が広がっている。このことから、走行列車が減速中であると思われる。このため解析は、時速 40km, 50km, 60km の列車速度を設定して行った。解析結果のたわみの最大値は、実測たわみとほぼ同じ値を示し、列車走行解析モデルとしては、妥当であると判断した。

(2) 列車高速走行時の PRC 桁の動的挙動解析

ここでは、検討対象 PRC 桁を走行列車が高速走行する場合の動的挙動の解析的検討を行う。列車走行は、単線走行と複線走行を考慮し、走行速度は 50km/h～250km/h 間は 50km/h 毎に、250km/h 以上は 10km/h 毎に速度を向上させて 400km/h まで解析を行った。以下に、解析結果を述べる。

a) 列車走行速度と桁のたわみ挙動の検討

図-8(a)は、上り線走行時（単線走行時）の列車速度とスパン中央位置でのたわみの最大値の解析結果を示している。図-8(b)は、図-8(a)の解析結果を衝撃係数²⁾として表示したものである。図-8(a)からは、300km/h を超えると急激にたわみが増大し、330km/h で最大値を示している。このことから、本 PRC 桁の 1 次共振速度は 330km/h 付近であることがわかった。曾我部らの研究¹⁾によって、1 次共振速度の簡易式が提案されているが、その計算結果も 340.5km/h となり、概ね解析結果と一致する。

図-8(b)で示した衝撃係数²⁾は、式(1)で算定した。衝撃係数は、列車走行により構造物に生じた動的応答のうち、静的応答に対する増加部分を意味している。

$$i = \frac{f_d - f_s}{f_s} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 i : 衝撃係数

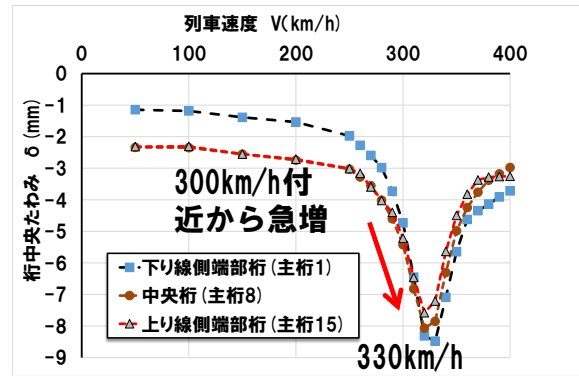
f_d : 動的なたわみの最大値

f_s : 静的なたわみの最大値

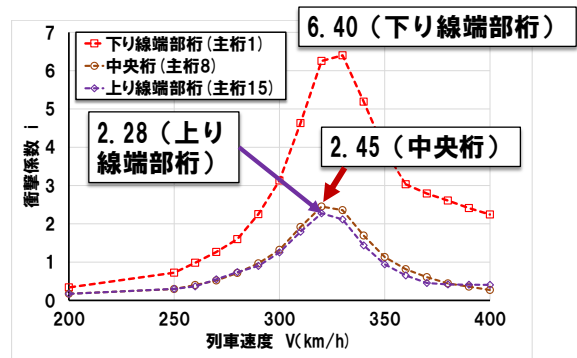
静的なたわみ (f_s) の最大値は、時速 50km 時のたわみ値とした。既往の研究¹⁾では、静的なたわみの最大値として時速 30km としているが、時速 50km でも動的な影響の出現はかなり小さいものと考えられる。

上り線のみ単線走行時の衝撃係数の最大値は、下り線側の最外縁に位置する桁で、6.4 となった。構造中心に位置する桁の衝撃係数で 2.45、列車走行をしている上り線位置の桁で 2.28 であった。

複線走行時の解析結果を図-9(a)(b)に示す。図-9(a)は、複線走行時の列車速度とスパン中央位置でのたわみの最大値の解析結果を示したものである。図-9(b)は、図-9(a)の解析結果を衝撃係数として表示したものであ

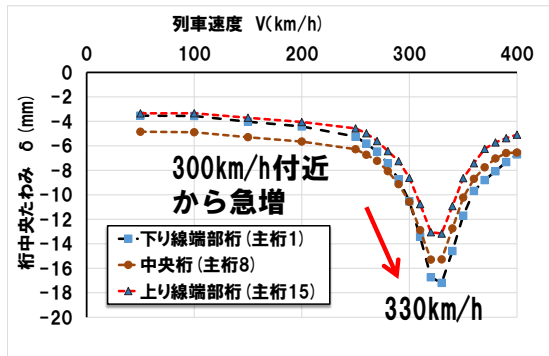


(a) 列車走行速度と桁のたわみの最大値

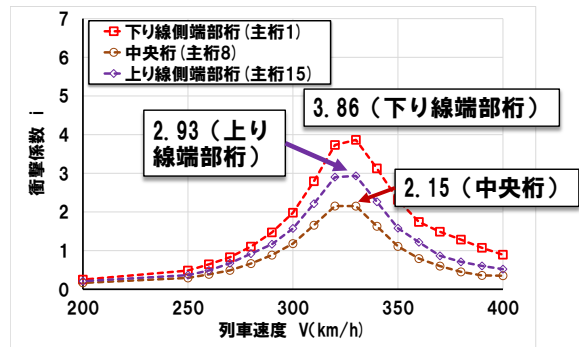


(b) 列車走行速度と桁の衝撃係数

図-8 単線走行時の列車走行解析結果



(a) 列車走行速度と桁のたわみの最大値



(b) 列車走行速度と桁の衝撃係数

図-9 複線走行時の列車走行解析結果

る。衝撃係数は、式(1)から算定した。複線載荷の解析は、上り線、下り線ともに、同じタイミングで走行列車が桁に載荷し、同じスピードで桁上を走行するようにした。

図-9(a)からは、1 次共振速度の値は単線走行と同様

に 330km/h 程度となること、たわみの最大値が約 17mm 程度で、単線走行時の概ね 2 倍程度となった。図-9 (b) に示した衝撃係数に関しては、下り線側最外縁位置の桁で 3.86、構造中心位置の桁で 2.93、上り線側最外縁位置の桁で 2.15 であった。

図-8(a)と図-9(a)を比較すると時速 250km までのたわみ挙動に関しては、単線走行時と複線走行時で違いが見られる。単線走行時では、構造中心位置の桁、列車走行している上り線側の桁よりも下り線側最外縁に位置する桁のたわみが小さくなる。複線走行では、上り線側最外縁位置の桁、下り線側最外縁位置の桁はほぼ同じ値のたわみの最大値を示し、構造中心位置の桁のたわみが一番大きくなる。共振速度領域となる 330km/h 前後の走行速度では、単線走行時で下り線側最外縁部の桁が他の桁よりもたわみの最大値が大きくなり、複線走行時も同様な挙動を示した。

b) スパン中央位置の桁横断方向の各主桁のたわみ挙動

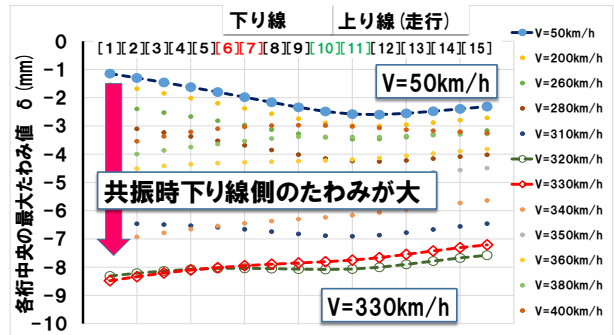
図-10(a)(b)は、列車走行速度ごとにスパン中央位置での各桁のたわみの最大値を桁ごとに並べて示したものである。図-10(a)は単線走行時、図-10(b)は複線走行時を示している。

図-10(a)の単線走行時からは、時速 50km の低速走行時では列車走行位置の桁のたわみが大きいものに対して、時速 330km の共振速度域では下り線側最外縁部の桁(図-10(a)図中の [1] の桁)が大きなたわみとなる。これは、共振速度付近になると、桁のたわみ挙動とねじり挙動が連成するためと考えられ、下り線側幅員が大きいため、ねじり挙動が卓越したものと推測される。

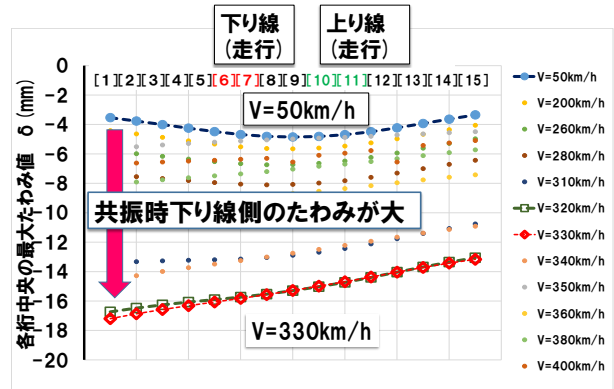
図-10(b)は、複線走行時を示したものである。複線走行時では、時速 50km の低速走行時で構造中心位置付近の桁(図-10(b)図中の [8] の桁)が一番大きなたわみ値となり、下り線側最外縁の桁(図-10(b)図中の [1] の桁)、上り線側最外縁の桁(図-10(b)図中の [15] の桁)はほぼ同じ値となっている。スパン中央位置での各主桁のたわみ分布は、中間横梁のたわみ曲線と近似している。時速 330km の共振速度域では、単線走行時と同様に下り線側最外縁部の桁(図-10(b)図中の [1] の桁)のたわみが大きくなり、[1] の桁と [15] の桁とのたわみ差が約 4mm となっていた。この原因は、単線走行時のところでも述べたが、桁のたわみ挙動とねじり挙動の連成によるものと考えられる。

4.3 鋼製門型電化柱のたわみ挙動

桁の動的挙動とともに、鋼製門型電化柱横梁中央位置の鉛直変位挙動に着目した。時速 V=260km, 330km, 360km について、鋼製電化柱横梁中央位置の鉛直方向変位波形を図-11(a)(b)に示す。図-11(a)は単線走行時、図-11(b)は複線走行時を示している。なお、図-

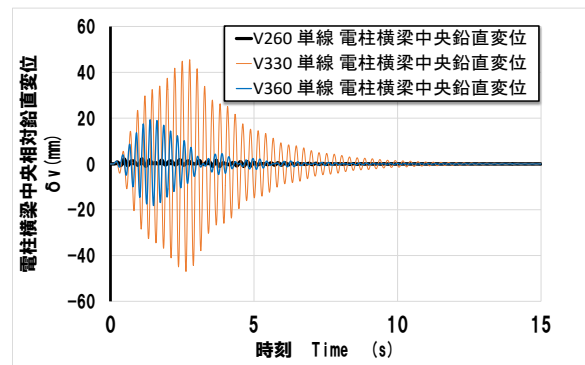


(a) 単線走行時

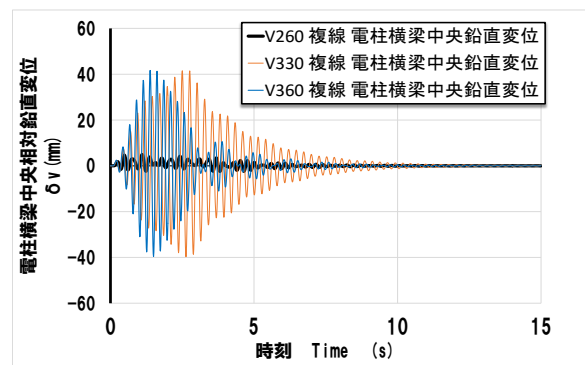


(b) 複線走行時

図-10 線路直角方向の各主桁のたわみ挙動



(a) 単線走行時



(b) 複線走行時

図-11 鋼製門型電化柱横梁の中央位置鉛直変位

11(a)(b)は、鋼製電化柱横梁中央の絶対鉛直変位波形から構造中心位置の桁のたわみ波形を差し引き、鋼製門型電化柱横梁中央位置のみの鉛直変位波形として示した。構造中心位置の桁のたわみ波形は、スパン中央位置での

各主桁の平均的なたわみを表しているの、鋼製門型電化柱横梁のみの鉛直変位波形を求めるために用いた。

鋼製電化柱横梁中央の鉛直変位の最大値は、時速 260km での単線走行時で 2.3mm、複線走行時で 4.9mm であった。桁の 1 次共振速度となる時速 330km では、単線走行で 47.0mm、複線走行で 41.5mm であった。時速 360km では、単線走行時で 19.3mm、複線走行時で 41.7mm であった。桁の 1 次共振速度である 330km/h 時では、260km/h 走行時と比べて鋼製門型電化柱横梁中央位置の鉛直変位が単線走行時で 20.4 倍、複線走行時で 8.5 倍となる大きな応答を示した。これは、固有値解析結果で示されたように、桁の 1 次固有モードが鋼製門型電柱横梁の鉛直方向変位と連成する特性を有し、応答が増幅したためであると推察される。

時速 360km 走行では、330km/h 時と比較して、単線走行時で約 60% 低減した鉛直変位量になったが、複線走行時では低減されずにほぼ同じ値となった。また、複線走行時の鉛直変位の最大値が単線走行時の 2.2 倍になっている。これは、複線走行時の走行列車が単線走行の 2 倍となり、鋼製門型電化柱への加振力も 2 倍になったためと考えられる。360km/h 走行時の鋼製電化柱横梁の時刻歴の鉛直波形からは、うなりの鉛直波形形状が示された。うなり現象を誘発している振動数成分を調べるため、鋼製門型電化柱横梁中央の鉛直変位波形の FFT 解析を行った。図-12 に、鋼製門型電化柱横梁中央鉛直変位波形の FFT 解析結果を示す。卓越する振動数は 4.199Hz であったが、3.711Hz と 4.688Hz にもフーリエ振幅のピークが確認できる。3.711Hz は桁構造部の 1 次固有振動数に、4.688Hz は全体系 5 次モードにそれぞれ近接している。

4.199Hz が卓越する理由を探るため、構造中心位置の桁のたわみ波形の FFT 解析を実施した。その結果、卓越する振動数は 4.0Hz となっていた。加振振動数 4Hz は、新幹線車両の車軸間距離が 25m(例えば、1 軸目から 5 軸目間の距離)であり、時速 360km 走行時に励起する振動数である。時速 360km 走行時における鋼製門型電化柱横梁中央位置の鉛直方向の変形挙動は、桁構造部と鋼製門型電化柱横梁の振動特性、走行列車の加振周波数に依存した動的挙動になっていると考えられる。

5. まとめ

本報告は、広幅員の鉄道用 PRC 単純 T 形 15 主桁の列車高速走行時の動的挙動に着目した検討を行った。検討結果を以下にまとめる。

- (1) 固有値解析結果から、桁の変形が卓越するモードは全体系の 4 次、6 次、8 次に出現し、鋼製門型電化柱との連成するような変形モードが認められた。
- (2) 列車走行解析結果から、1 次共振速度は 330km/h

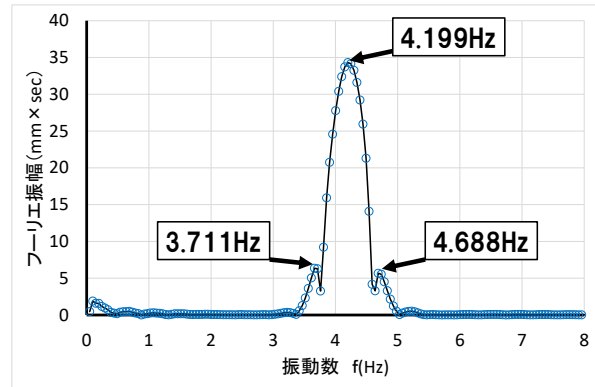


図-12 鋼製電化柱横梁の中央位置鉛直変位波形の FFT 解析結果 (複線走行時)

で、たわみモードとねじりモードの連成する変形モードとなるため、下り線側の最外縁に位置する桁のたわみが他の桁よりも大きくなった。

- (3) 鋼製門型電化柱横梁中央の鉛直変位挙動は、特に 360km/h の列車走行時、うなりとなる振動波形形状を示し、桁の 1 次固有モード、電化柱横梁の鉛直変形モード、列車走行時の加振周波数の影響を受けることがわかった。

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,I-62, pp.83-102, 2003.1
- 2) 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.
- 3) 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.1081-1086, 2008.7
- 4) 隈部佳, 原田悟, 岩田道敏, 大久保孝昭: 高橋脚を有する橋梁の新幹線走行に伴う振動について, Vol.34, No.2, pp.919-924, 2012.7
- 5) 金田 淳, 小林 薫: 高速列車走行時におけるコンクリート桁の動的挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, 2006.7