

論文 新幹線 PRC 桁の共振動現象に関する調査分析

千頭 啓司*1, 杉田 清隆*2, 築嶋 大輔*3

要旨：特定の速度域の新幹線走行に伴い、共振傾向を示す PRC 桁が確認されている。しかし、桁の固有振動数と列車の加振振動数は乖離しており、列車通過時に桁の固有振動数が変化していることが考えられ原因を調査した。調査の結果、列車通過時にひび割れが開口し剛性が低下していることが分かった。また、共振傾向を示している桁と同種構造の桁が複数設置されているが、共振傾向が確認されたのは一部の桁のみであったため原因の究明に向けて、桁ごとの個体差について調査した。また、作用（列車荷重の載荷状況）の違いについても調査した。調査の結果、桁ごとの個体差よりも作用の影響が大きいと想定される結果が得られた。

キーワード：PRC 単純 T 桁、共振、固有振動数、ひび割れ、複線同時載荷

1. はじめに

新幹線高架橋において、特定の速度域の新幹線走行に伴い、プレストレスト鉄筋コンクリート（以下、PRC）単純 T 形 4 主桁（複線桁）の大振幅振動が確認されている^{1),2)}。これは、新幹線走行時の輪重による加振振動数と桁の固有振動数が接近することで、共振傾向を示しているためと報告されている。これまでの調査にて、共振が発生している桁（以後、共振桁とする）の固有振動数は共振が発生していない桁（以後、非共振桁とする）の値より小さい値となっていることが確認されている^{1),2)}。しかしながら、実測した共振桁の固有振動数は列車の加振振動数と乖離があり、何らかの原因により列車通過時は固有振動数が変化していることが考えられる。

また、この現象は同一の標準設計が適用されている桁が多数存在する中でも一部の桁でのみ生じており、桁毎

に発生時期が異なっていることから何らかの原因により桁の固有振動数が低下し、共振傾向を示すと考えられる。桁の固有振動数が低下する原因は、桁の振動特性の個体差や桁の位置毎に新幹線走行による作用の違いがあるものと推察されるがその原因については、明らかにされていない。

本稿では、列車通過時に固有振動数が変化する原因と一部の桁のみで共振が生じている原因について調査した結果について述べる。

2. 共振原因の調査

2.1 設計図面調査

表－1 に示すように、設計図面により共振桁と非共振桁の差異を確認したところ、地覆の高さ、防音壁の形状および電柱の設置位置など付帯物については多少の差異

表－1 調査結果

橋りよう	共振の有無	支間 (m)	橋りよう 幅員 (m)	桁 高 (m)	路盤コン 厚さ (mm)	地覆 高さ (mm)	電柱 位置	防音壁		固有振動数(Hz)			最大たわみ時の列車	
										計算値		実測値	速度 (km/h)	加振振動数 (Hz)
								形状	高さ(mm)	ケース 1	ケース 2			
A	有	29.2	11.3	1.7	250	400	中間	逆L型	2,000	2.84	3.30	2.93	225	2.50
B							端部	直型	3,400	2.86	3.33	2.99	230	2.56
C										中間	2.83	3.29	2.93	221
D						675	なし	—	2.89		3.41	3.05	227	2.52
E	570					端部			2.92	3.41	3.30	238	2.64	
F	580	なし	2.94	3.43	3.60	—			—					
G	400		逆L型	2,000	2.88	3.35	3.42	—	—					

*1 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター（正会員）

*3 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター 課長（正会員）

があるが、共振の有無との関係は認められなかった。また、設計図面から求められる固有振動数は、主桁およびスラブなど設計上考慮する構造部材のみで計算した値(ケース1)で、共振桁は2.83Hzから2.92Hz、非共振桁は2.88Hzから2.94Hzであった。構造部材に地覆や路盤コンクリートなどの非構造部材を加えて計算した値(ケース2)では、共振桁は3.29Hzから3.41Hz、非共振桁は3.35Hzから3.43Hzであった。衝撃振動試験によって求めた実測値は、共振桁は2.93Hzから3.30Hz、非共振桁は3.42Hzから3.60Hzであった。なお、地盤反力や桁を支持する支点の鉛直ばねの影響は考慮していない。最大のたわみが発生している列車速度から逆算した加振振動数は2.46Hzから2.64Hzとなり、ケース1・ケース2・実測値のいずれの固有振動数よりも低くなっていることが分かった。

2.2 現地外観調査

設計図面調査では、共振桁と非共振桁に明確な差異が確認できず、また列車の加振振動数と計算上と実測の固有振動数が異なっていることから現地外観調査を実施した。調査の結果、共振桁に曲げひび割れが発生しており、スパン中央付近では桁下面から桁高の半分程度まで伸びた曲げひび割れが生じている桁も確認された。このことから、共振桁では曲げひび割れが多く発生しているため、固有振動数が低下したと想定した。

2.3 列車通過時の剛性変化

図-1に示すように、共振桁には主桁下面に曲げひび割れが多く発生していたことから、列車通過時に桁がたわむことで曲げひび割れが開口し、主桁の有効断面積が減少することで剛性が低下し、固有振動数が低下する可能性が考えられた。図-2に共振桁における列車通過後のたわみ量の時刻歴波形を示す。また、図-3に1波ごとのたわみ量と1波ごとの固有振動数(波がピークからピークに至るまでの時間の逆数から算出した固有振動数)の関係を示す。図-3は横軸にたわみ量、縦軸に固有振動数を示している。たわみ量が増えるにつれて、固有振動数が低下することが確認できる。

以上のことから、共振桁では列車通過時に桁がたわむことで曲げひび割れが開口し、主桁の有効断面積が減少することで剛性が低下し、固有振動数が低下することが分かった。固有振動数が低下することで列車の加振振動数に近づき共振現象が生じていると考えられる。

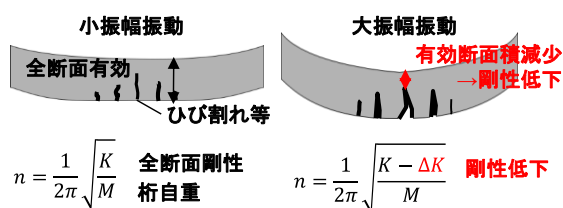


図-1 列車通過時の桁の剛性低下

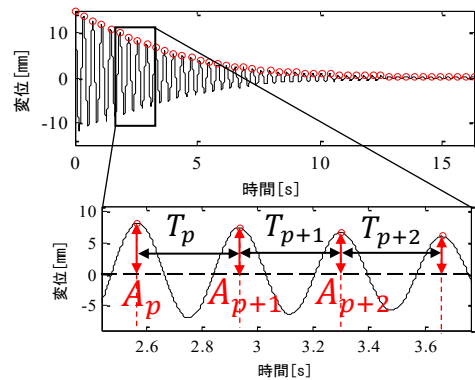


図-2 列車通過後のたわみ量の時刻歴波形

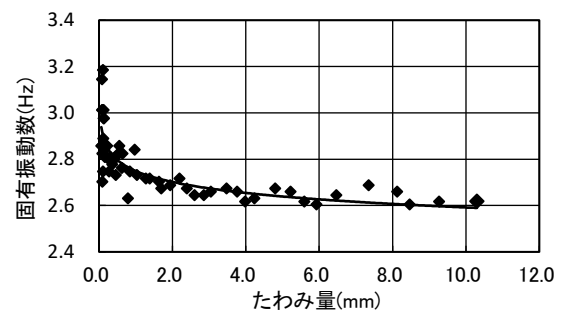


図-3 たわみ量と固有振動数の関係

3. 詳細調査(共振桁および非共振桁の個体差)

3.1 調査対象

主桁下面において曲げひび割れの発生状況に差が生じる原因を究明するため、共振桁と非共振桁を対象に詳細調査を実施することとした。表-2に調査対象とした2橋りょうの諸元を示す。電柱の設置位置など付帯物に多少の差はあるが、図面から計算で求められる固有振動数の差は0.04Hzであり、ほぼ等しくなっている。しかしながら、実測した固有振動数の差は0.49Hzであり、また最大たわみ量の差は13.0mmと大きく乖離している。

3.2 調査項目

一般に桁の固有振動数は、ベルヌーイ・オイラー梁の弾性理論である式(1)から算出される。表-1で示した通り、式の変数のうち支間長は共振桁と非共振桁ともに29.2mと同じ値となっている。また、死荷重も防音壁の高さ等、付帯物に多少の差があるものの、共振の発生を左右するような大きな差異はない。そこで、固有振動数に影響を与えるものとして、コンクリートの弾性係数(E)と断面二次モーメント(I)に着目し、これらに関する項目について調査を実施した。

$$n = \frac{\pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI \cdot g}{D_1 + D_2}} \quad (1)$$

n: 桁の基本固有振動数(Hz) L: 支間長(m)

g: 重力加速度(m/sec²)

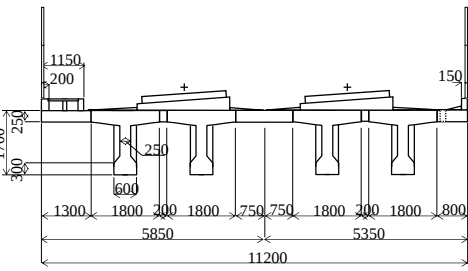
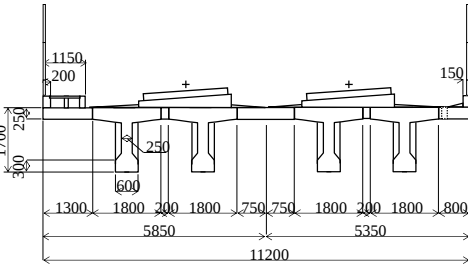
I: 断面二次モーメント(m⁴)

E: コンクリートの弾性係数(kN/m²)

D1: 単位長さあたりの固定死荷重(kN/m)

D2: 単位長さあたりの付加死荷重(kN/m)

表-2 調査対象橋りょう

橋りょう名称	共振桁(A 橋りょう)	非共振桁(G 橋りょう)
支間長	29.2m	29.2m
桁高	1.7m	1.7m
固有振動数(計算)	2.84Hz	2.88Hz
固有振動数(実測)	2.93Hz	3.42Hz
最大たわみ量	22.67mm	9.67mm
外 観		
断面図		

3.3 主桁の弾性係数と圧縮強度

既往の研究⁴⁾において、コンクリートの圧縮強度が同程度であっても、弾性係数が異なることが確認されている。本研究で対象としているコンクリート桁の設計基準強度は 40N/mm^2 であり、25%程度のばらつきが発生している可能性が考えられる。共振桁(A 橋りょう)と非共振桁(G 橋りょう)の弾性係数の違いを確認するため、 $\phi 50\text{mm}$ の湿式コアドリルを用いて $\phi 45.4\text{mm}$ のコンクリートコア(以後、コアとする)を共振桁と非共振桁からそれぞれ4本ずつ採取した。図-4にコアの採取位置を示す。また、図-5に示すように、採取したコアを湿式のコンクリートカッターにより切断し、高さが直径の2倍程度となるように加工したものを試験体として使用した。

図-6に JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法に準拠し採取したコアから計測した弾性係数の結果を示す。コアごとに値のばらつきはあるが、弾性係数の平均値は共振桁で 22.7kN/mm^2 、非共振桁で 20.8kN/mm^2 と共振桁の弾性係数が 1.9kN/mm^2 程度高くなっている。コンクリートの弾性係数の違いが共振の発生原因であるな

ら、共振桁の弾性係数は非共振桁の値より小さくなっている必要があるが、結果は逆になっていた。このことから、コンクリートの弾性係数が共振の発生原因ではないと考えられる。なお、図-7に示すように、コアの圧縮強度の平均値は、共振桁で 55.5N/mm^2 、非共振桁で 34.5N/mm^2 となっており、弾性係数と同様に共振桁の値の方が大きくなっていた。

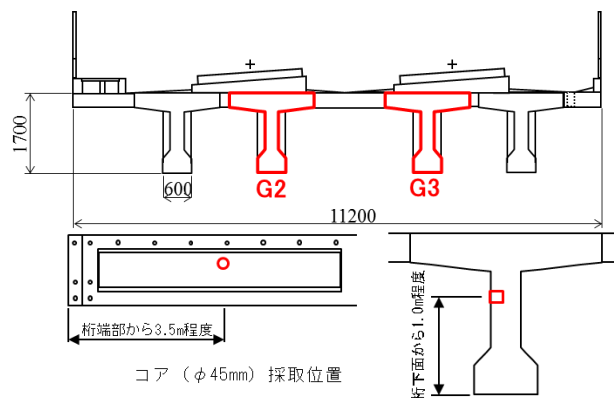


図-4 コンクリートコアの採取位置

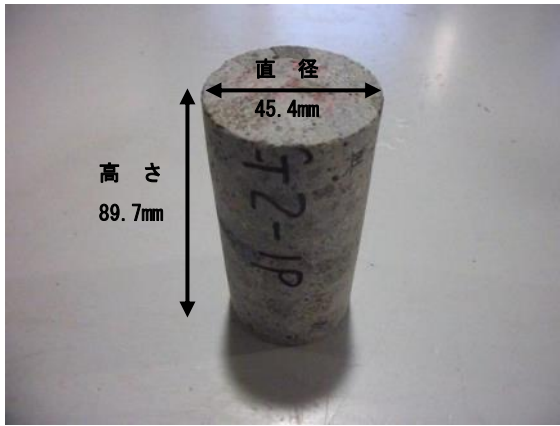


図-5 試験体の形状

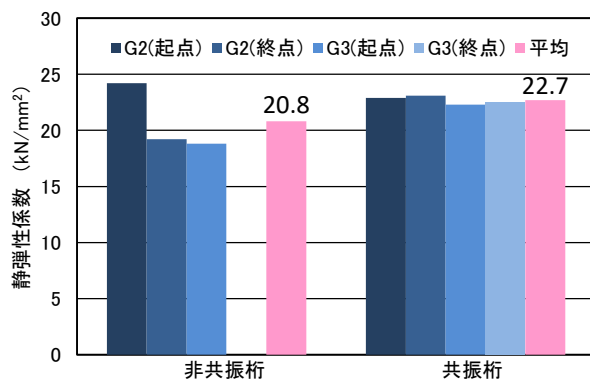


図-6 弾性係数の試験結果

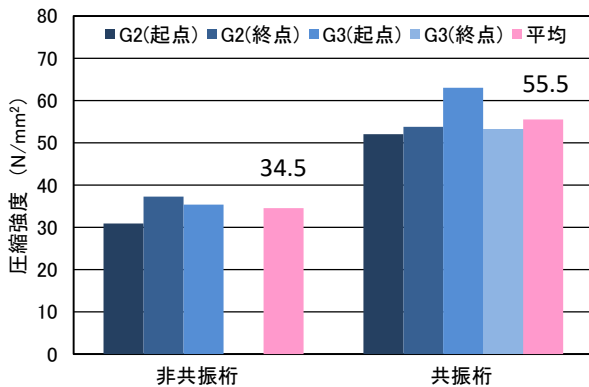


図-7 圧縮強度の試験結果

3.4 非構造部材との一体性

地覆や路盤コンクリート等といった非構造部材の桁全体の剛性へ寄与が、共振桁と非共振桁で異なっていないか確認するため、列車通過時のコンクリート表面のひずみを計測した。なお、非共振桁のひずみはスパン中央で計測したが、共振桁はスパン中央付近に電柱が設置されているため、電柱位置を避けてスパン中央から2.5mずらした位置で計測した。代表値として、下り線を列車が通過した際における3時点でのひずみ分布を示すこととする(下①～③)。共振桁のひずみ分布を図-8、非共振桁のひずみ分布を図-9に示す。たわみ量が異なるため

一概に比較はできないが、共振桁、非共振桁ともに列車通過時に、主桁下面に引張側のひずみ、地覆および路盤コンクリートに圧縮側のひずみが発生しており、ひずみ分布においても概ね平面保持が成立している傾向が確認された。この結果から、共振桁、非共振桁の非構造部材はともに機能しており、非構造部材との一体化の差が共振の発生原因ではないと考えられる。

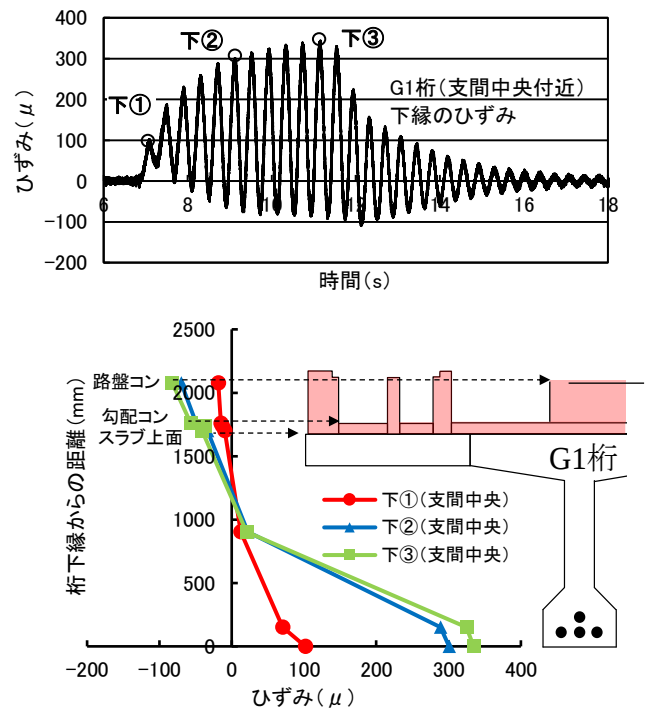


図-8 共振桁のひずみ分布

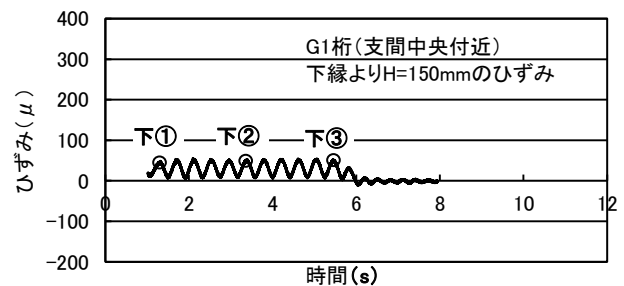


図-9 非共振桁のひずみ分布

3.5 桁内の有効プレストレス

桁内の有効プレストレス（以下、プレストレス）が小さい場合、主桁下面の引張応力が大きくなり、ひび割れが発生しやすい状況になるため、共振桁と非共振桁のプレストレスに差がないか確認した。プレストレスの測定は、応力解放法により行った。応力解放法は、構造物に予めひずみゲージを貼り付けておき、ひずみゲージの周辺をコンクリートカッターにより溝を切ることによって応力を開放し、現有応力を推定する方法である。図－10 に試験の概要を示す。本研究では、共振桁、非共振桁とも4主桁のうち内側の主桁2本で計測した。また、計測箇所はスパン中央の主桁下面とした。なお、ひずみゲージは3軸のものを使用し、ロゼット解析の計算方法である式(2)から解放応力を算出した。試験結果を表－3 に示す。共振桁と非共振桁の解放応力を比較したところ、平均値はわずかに共振桁の値が大きいことが確認された。

以上のことから、共振桁に緊張力不足が発生していることはなく、緊張力の差が共振の発生原因ではないと考えられる。

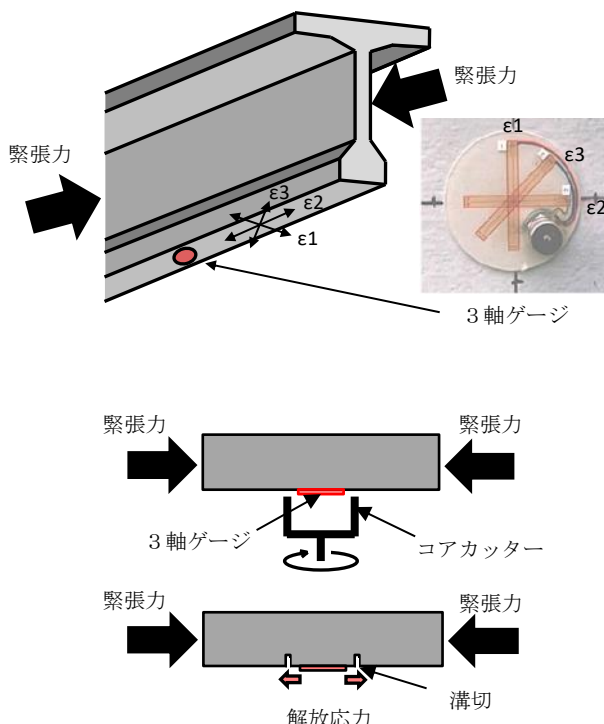
$$\sigma = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \nu} + \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{2 \{ (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 \}} \right] \quad (2)$$

ここに、 σ ：解放応力

E ：コンクリートの弾性係数

ν ：ポアソン比

ε ：ひずみ（図－10 参照）



図－10 応力解放法の試験概要

表－3 応力解放法の試験結果

橋りょう名	桁番号	解放応力 σ (N/mm ²)	平均応力 σ (N/mm ²)
共振桁	G2 桁	0.77	0.68
	G3 桁	0.58	
非共振桁	G2 桁	0.47	0.57
	G3 桁	0.66	

3.6 調査結果

共振原因を究明するため、共振桁および非共振桁を対象に、コンクリートの弾性係数と圧縮強度、非構造部材との一体性および主桁の緊張力といった個体差について調査したが、いずれの調査からも共振の原因を特定できるような差異は確認されなかった。

以上のことから、共振の発生は、桁ごとの個体差だけが原因では生じていないことが分かる。

4 作用力の影響

4.1 複線同時載荷

ひび割れの発生を左右するものとして、桁の個体差以外に列車荷重等の作用力の影響が考えられる。通常的设计では、使用時のひび割れ照査は単線載荷による照査を行う。しかしながら、共振が発生している桁は複線桁であるため、上下線の列車がすれ違う際には大きな作用力が発生する。すれ違いの際に発生する通常よりも大きな応力が繰り返し発生することで、ひび割れが進行している可能性が考えられる。そこで、統計的に複線同時載荷の頻度と共振桁の関係について調べることにした。図－11 は複線同時載荷のイメージを示している。上図は列車ダイヤを示しており、実線が下り線、破線が上り線となっている。また、丸印で示している箇所が、上下線の列車がすれ違う箇所である。上下線の列車荷重が同時に載荷されるため大きな応力が発生する。図－12 は共振桁であるA橋りょうにおける列車ごとの最大たわみ量を示しており、複線同時載荷時のたわみ量が大きいことがわかる。

4.2 複線同時載荷頻度の算出方法

複線同時載荷頻度の算出方法は、共振桁を含む区間において、列車の1編成を点として捉え、上下線でその点同士が30m（スパン程度）以内に入る回数をカウントした。また、走行速度については、ランカブ通りの速度で走行するものとし、発車時間については、列車ダイヤを基準に10秒の標準偏差の正規分布で乱数を発生させた。複線同時載荷頻度の算出期間は当該線の開業時から現在までであり、その間のダイヤ改正も反映させている。

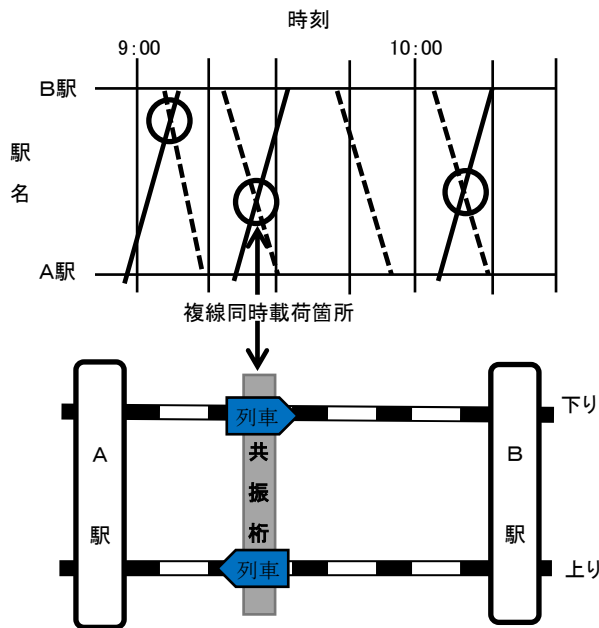


図-11 すれ違いのイメージ

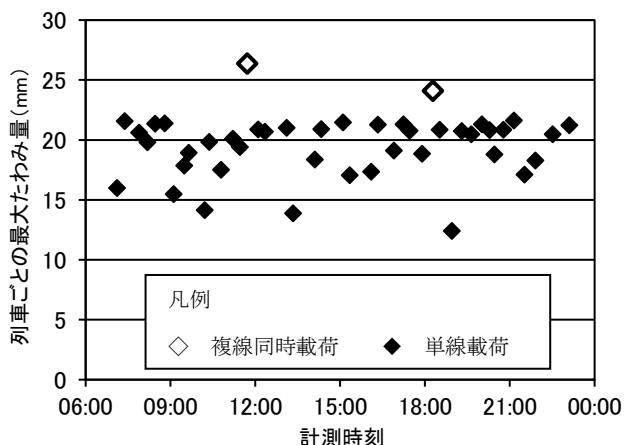


図-12 列車ごとの最大たわみ量

4.3 複線同時載荷頻度の算出結果

複線同時載荷頻度分布を図-13に示す。図-13には、同一の標準設計による共振桁と非共振桁の位置も示している。算出の結果、当該区間の複線同時載荷頻度に明らかな偏りがあることが確認された。また、共振桁についてはその頻度が高く、非共振桁については、その頻度が低い傾向にあることが確認された。一部の共振桁については、複線同時載荷頻度が低い箇所にも位置している。これは今回の検討では複線同時載荷となる回数のみをカウントしていることが原因していると思われる。共振には複線同時載荷頻度だけでなく、通過時の列車速度や、列車ごとの乗車率の影響もあり、これらを考慮することでより実現象に近い結果を得ることができると考える。

以上のことから、今回の調査では全ての桁で個体差の影響が無いとは言えないが、作用については桁ごとに明らかな偏りがあり、共振桁では複線同時載荷が発生する回数が多く、それにより大きなたわみが発生することでひび割れが進展し、剛性が低下している可能性が高い。

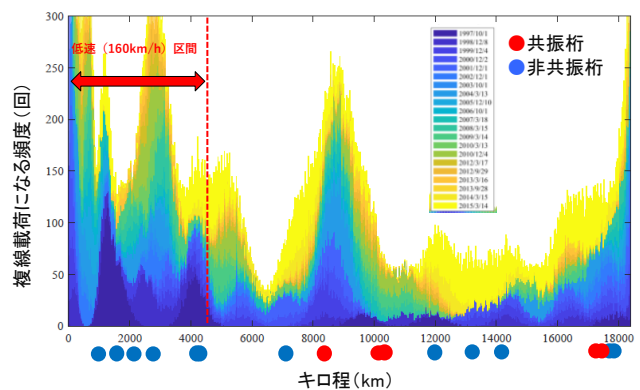


図-13 複線同時載荷頻度と桁の関係

5. まとめ

今回の調査から得られた結果を以下に示す。

- (1) 列車通過時に固有振動数が変化する原因は、列車通過時に主桁下面の曲げひび割れが開口することで有効断面積が減少し、桁の剛性が低下することで、固有振動数が減少するためだと考えられる。固有振動数が減少することで列車の加振振動数に近づき、共振現象が生じていると考えられる。
- (2) 調査を行った A 橋りょう（共振桁）と G 橋りょう（非共振桁）では、コンクリートの弾性係数、圧縮強度、非構造部材との一体性および緊張力といった個体差に明確な違いはなく、曲げひび割れの発生状況に影響を及ぼす有意な差はなかった。
- (3) 複線同時載荷時は特に大きな作用を受けており、その際に主桁下面に曲げひび割れ進展し、剛性が低下していると考えられる。
- (4) 複線同時載荷の頻度は桁によって大きく異なっており、この違いが同じ標準設計を適用した桁でも共振する桁と共振しない桁が存在する原因となっていると考えられる。

参考文献

- 1) 藤江幸人, 井口重信, 古賀誠, 松田芳範, 大庭光商: 新幹線走行に伴う PRC 単純桁の振動について, SED No.33, pp.52-59, 2010.1
- 2) 藤江幸人, 井口重信, 松田芳範, 小林薫: 報告 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
- 3) 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, 土木学会構造工学論文集 Vol.62A(2016.3)
- 4) 樋口 芳朗編: コンクリート・ライブラリー第 61 号 コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) 改訂資料, 社団法人 土木学会, 1986