

共振発生リスクのある新幹線 PRC 単純桁の監視手法について

JR 東日本コンサルタンツ(株) 正会員 ○宝蔵寺 宏彰

JR 東日本コンサルタンツ(株) 正会員 逸見 研二

JR 東日本 高崎支社 正会員 荻原 裕貴

JR 東日本 高崎支社 正会員 原田 悟

1. はじめに

北陸新幹線高崎～軽井沢間の PRC 単純桁(図 1)において, 3 連で列車通過時に大きなたわみが発生していた。通常のとわみ波形とたわみの増大波形を図 2 に示すが, 問題箇所のとわみ量は 20mm を上回ることもあり, 設計標準に定められた走行安全性の基準値に迫る状況であった。たわみ量は, 図 3 に示すように, 通過列車速度に応じて増大しており, 共振現象によるものと考えられた。

同一設計の桁長 30m の PRC 単純桁(以下, 類似桁という。)が数十連存在しているため, 他の箇所でも同様に共振の発生が懸念される状況であった。本稿では, 共振発生のメカニズム解明のための調査結果, 共振発生リスクのある PRC 単純桁の監視手法と実績について報告する。

2. 共振発生のメカニズム把握のための比較調査

共振発生のメカニズム把握のために同一構造で, 共振が確認されている箇所と確認されていない箇所の上部工および下部工に対して以下の調査を実施した。

上部工については, 31t の軌道モーターカーを用いた静的載荷試験, 桁の鉛直打撃による衝撃振動試験, 列車通過時のたわみ測定を実施した。静的載荷試験では桁の支点, 桁中央の変位を計測した。各々の静的たわみ量と単純梁として剛性を逆算した EI の算定値を表 1 に示す。共振なしの桁に対し共振ありの桁は, 静的たわみが大きく, 剛性 EI は小さかった。また, 支点沈下は微小であり, 有意な差はなかった。衝撃振動試験においては桁に 15 点のセンサを設置し, 各振動モードの固有振動数を計測した。計測したモード図を図 4 に, 計測結果を表 2 に示す。共振桁の固有振動数は他の桁と比較して 1 次モードの振動数で 15%程度低いことが判明した。列車通過時のたわみ計測では, 特定の速度でたわみが大幅に増大し, 片線載荷であっても上下線が同位相で桁中央が最大であることから, 1 次モードで共振状態に陥っていることを確認した。

下部工は, 衝撃振動試験, 固有値解析を実施し, 橋脚高さ等の差異は桁の固有振動数に影響するものではないことを確認した。なお, 共振の際, 電柱も大きく振動していたが, 電柱の有無によらず桁の共振は発生しており, 電柱が桁の共振を励起しているわけではないと判断した。

以上より, 桁の振動性状に下部工, 支点部, 付帯物の影響は少なく, 同一構造であっても実際の桁剛性に差があり, 結果として固有振動数に違いが生じていることが判明した。固有振動数が低い桁は, 列車の運行

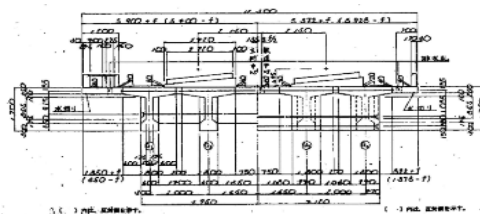


図 1 類似の PRC 単純桁 (30m) 一般図

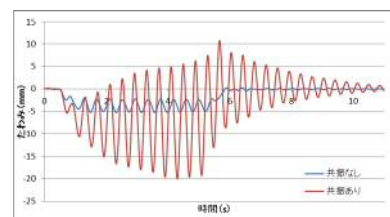


図 2 共振桁と非共振桁のたわみ波形

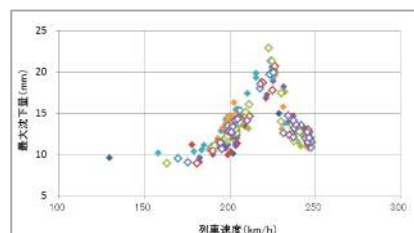


図 3 通過列車速度とたわみ

表 1 軌道モーターカーによる静的載荷試験結果

静的載荷試験 (3回平均)		桁A (共振なし)	桁B (共振あり)
桁中央たわみ量 (mm)	下り線	-4.134	-5.690
	上り線	-0.630	-1.343
※下り線載荷時	上下平均	-2.382	-3.516
支点変位量 (mm)	支点1鉛直	-0.015	-0.007
	支点2鉛直	-0.211	-0.003
	※下り線載荷時	0.003	-0.042
	支点4鉛直	-0.008	0.002
逆算剛性EI (kN/m ²)		6.42E+07	4.35E+07

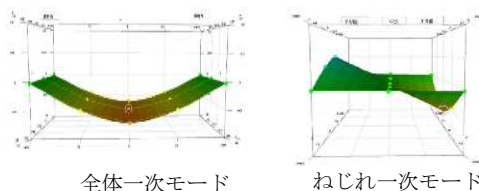


図 4 衝撃振動試験モード図

表 2 桁の衝撃振動試験結果

桁名	固有振動数 (Hz)			
	全体1次モード	ねじれ1次モード	ねじれ2次モード	
			上り線側	下り線側
桁A (共振なし)	3.54	4.64	12.45	13.55
桁B (共振あり)	3.05	4.52	11.72	12.94
桁C (共振なし)	3.42	-	12.70	13.79
桁D (共振なし)	3.66	4.76	13.18	13.92

速度内で列車の加振振動数と近くなる場合があり、これが特定の桁でのみ共振が発生するメカニズムである。したがって、共振発生の有無は、衝撃振動試験で特定した全体一次モードの固有振動数と列車の加振振動数の関係から評価可能であると考えた。

3. 類似桁の調査

共振発生のメカニズムが判明したことから、同一設計の桁数十連に対して衝撃振動試験とたわみ計測を実施した。30m 桁の固有振動数一覧を図5に示すが、類似桁でも実測値には大きなばらつきがあり、その中で 3.0Hz 程度の桁において共振が発生していた。新幹線車両からの加振は、図6に示すように、車両長 25m 周期の正弦波が主要な成分であり、260km/h で走行すると約 2.9Hz となり、桁の固有振動数に近い。

- ・加振振動数と共振速度の関係 $25\text{m} \times 2.89\text{Hz} \times 3.6 = 260\text{km/h}$

これより、高速の通過列車がある場所に位置し、固有振動数が低い桁において、固有振動数と加振振動数が近いことから、共振状態に陥っていることが確認できた。ここで、衝撃振動試験のフーリエスペクトルを振動数から速度に変換した結果とたわみの関係を図7に示す。理論上は桁の固有振動数が共振のピークとなるが、実際には逆算共振速度とたわみ最大時の列車速度との間には乖離がある。これは衝撃振動試験における微小ひずみと列車通過時の大変位時では、発揮する剛性に違いがあるものと考えられる。衝撃振動試験からの逆算共振速度とたわみ最大時の列車速度の関係を図8に示すが、両者の比率は 0.82 程度であり、速度差に換算すると 40～50km/h 程度である。さらに、実測データより共振の兆候が見え始める速度差を判読すると、共振の影響範囲に入り、たわみの増大が始まる速度差は概ね 65km/h 以内であり、この考え方が複数の類似桁で成立することを確認した。

4. 共振発生リスクの分類と維持管理方針の提案

共振のメカニズムと類似桁の調査結果より、桁の固有振動数と通過列車速度の関係から共振発生リスクを評価できることが確認できた。そこで、今後は、表3に示すとおり、逆算共振速度と通過列車との速度差で定量的に共振発生リスクを分類して維持管理していくこととした。各グループの閾値は、65, 80, 100km/h と段階的に設定した。グループが上位になるにつれて、将来的な共振発生に対して余裕が少ないため、たわみ計測と衝撃振動試験の頻度を増やし、固有振動数の低下時や列車運行速度の向上時にも対応できるものとした。

5. おわりに

共振発生の可能性がある PRC 類似桁において、共振発生リスクを定量的に分類し適切な計測頻度を定めたことで、膨大な対象箇所に対して列車走行安全性の確保と効率的な監視手法を可能とした。現在まで定期計測を約3年行ってきたが、その間に、共振が発生した桁は3連から6連に増加している。しかし、この維持管理方法により、事前にグループIとして捕捉し、共振発生時には対策工の実施など迅速に対応することを可能としている。現在では、この定期計測と併用してモニタリングによる監視体制も整えている。今後は、これまで蓄積したデータから剛性低下による進行性を定量化し、将来的な共振発生の予測が精度よく把握できるようになれば、計測頻度の緩和や適切な予備対策等の実施など、より効率的な維持管理ができていくものとする。

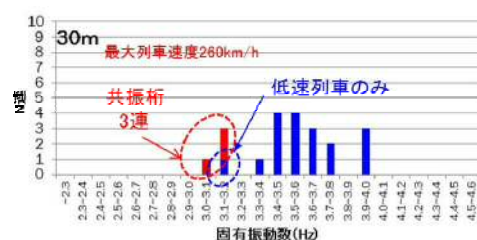


図5 30m 類似桁の実測固有振動数

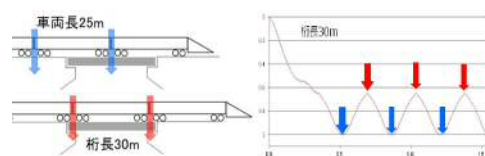


図6 30m 桁の加振イメージ

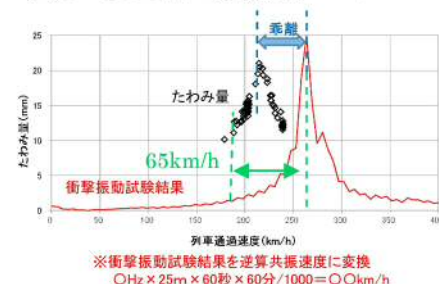


図7 逆算共振速度と実測列車速度

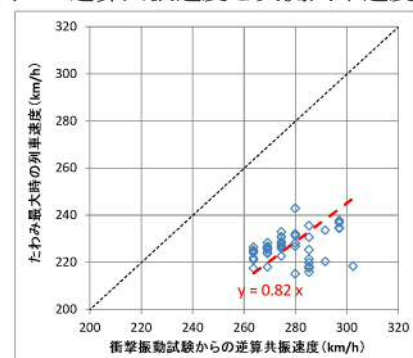


図8 逆算共振速度と実測列車速度

表3 グループ分類と計測頻度

グループ	共振の発生状況	逆算共振速度と 実測最大列車速度 の速度差	計測頻度	
			たわみ量	固有振動数
I	共振の可能性が高い。	64km/h以下	12回/年	12回/年
II	一部共振の兆候が認められる。	65～79km/h	4回/年	4回/年
III	共振は認められないが速度差に余裕が少ない。	80～99km/h	2回/年	1回/年
IV	共振が認められず、速度差にも大きく余裕がある。	100km/h以上	なし	1回/年