北陸新幹線新規開業区間における単純PC桁のたわみ測定結果に関する考察

(独)鉄道・運輸機構　設計技術部　正会員　工修　○進藤　良則
(独)鉄道・運輸機構　大阪支社　正会員　下津　達也
(独)鉄道・運輸機構　長野工事事務所　水谷　哲也
(独)鉄道・運輸機構　富山工事事務所　舟竹　弘次

1．はじめに

平成27年3月に開業した北陸新幹線，長野・金沢間228kmは平成4年の工事着手から20年余を経て開業した線区である。建設期間が長いため，コンクリート構造物の設計は鉄道構造物等設計標準の平成4年版（以下「H4RC標準」）によるものと平成16年版（以下「H16RC標準」）によるものがある。

開業前に実施する構造物の検査では実車走行による桁たわみ測定を実施し，走行安全性・乗り心地および桁の安全性の確認を行った。たわみ測定は既開業の九州新幹線（博多・鹿児島中央間）と東北新幹線（盛岡・新青森間）においても実施しており，実測値は設計値に対して小さい値であった。原因の１つとして列車荷重の動的作用である衝撃荷重が設計値よりも小さいことが考えられる。衝撃係数（衝撃荷重の列車荷重に対する比）の算出では，設計上の桁剛性には主桁のみを考慮するが，実構造物には路盤や地覆などの付帯構造物があり，実剛性は設計上の剛性よりも大きい。これは桁の固有振動数の実測値と設計値の相違からも確認している。そこで，平成16年以降の単純桁の設計では，付帯構造物の剛性を考慮した剛性補正係数（表-1）を導入し，実測に近い固有振動数を用いて衝撃係数を算定している[1)]。

本報告は，北陸新幹線新規開業区間における単純PC桁のたわみ測定結果から，剛性補正方法の妥当性についての検証結果を報告するものである。

表-1　単純桁の剛性補正係数[1)]

構造種類		剛性補正係数
RC桁	場所打ち防音壁H＝2.0m	3.0
	場所打ち防音壁H＜2.0m	2.0
PCT形桁		2.0
PC箱桁		1.5

2．測定橋梁

測定した単純PCT形桁は桁長20m～45mの桁に適用され，単純PC箱桁は橋長45mを超える桁に適用される。走行速度は30km/h，200km/h，260km/hの順に実施した。使用した車両は30km/hはEast-i，200km/hおよび260km/hはE2，E7系である（表-2）。

表-2 走行試験車両の編成および軸配置

走行試験車両	車両長	編成	軸　重	軸　配　置
EAST-i	20m	6両	10.8～14.9t	2.25m＋11.9m＋2.25m＋4.1m＋・・
E2系	25m	10両	10.1～11.7t	2.5m＋15.0m＋2.5m＋5.0m＋・・・
E7系	25m	12両	10.3～11.6t	2.5m＋15.0m＋2.5m＋5.0m＋・・・
P-16（軸配置はH荷重）			16t	2.5m＋15.0m＋2.5m＋5.0m＋・・・

3．測定結果

3.1　乗り心地のたわみ制限値との比較

桁のたわみ試験は単線走行で実施するため，使用性(乗り心地)の照査における荷重条件に近い。しかし，試験走行車両のEast-i，E2，E7系の軸重・軸配置は，設計で用いる標準列車荷重P-16の軸重・軸配置と相違するため，実測値を設計上の軸重・軸配置に換算する必要がある。P-16への換算方法は，桁を単純梁でモデル化し，表-2に示す試験列車の軸重・軸配置および設計上の軸重・軸配置（P-16）で連行移動載荷による最大理論たわみを算出し，両者の最大たわみ比を実測たわみに乗じて実測たわみのP-16換算たわみを算出した。260km/h走行時のP-16換算たわみを図-1に示す。

たわみの制限値は，鉄道構造物等設計標準（変位制限標準）（以下，「変位制限標準」）の乗り心地の照査に用いる限界値δ_{lim}とし，δ_{lim}はスパン長L_bにより，L_b＜20mではδ_{lim}＝L_b／2200，L_b≧20mでは

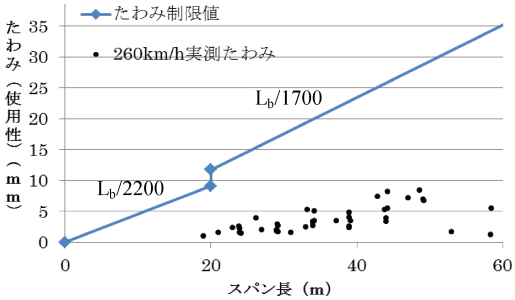


図-1　実測たわみとたわみの制限値（使用性）

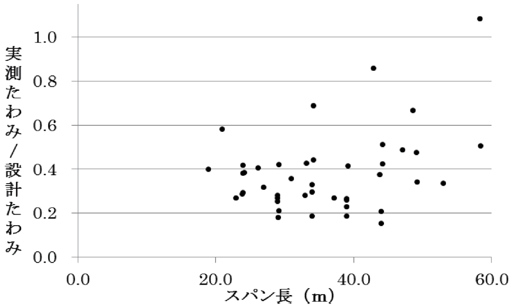
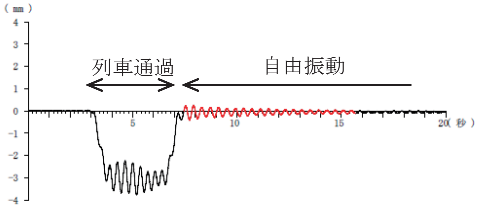


図-2　実測たわみと設計たわみの比



(a)　たわみの応答波形

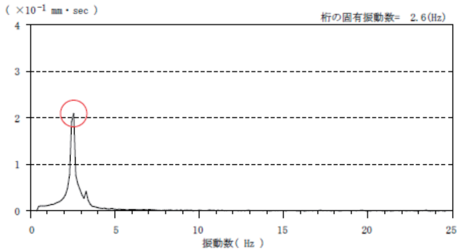

(b)　フーリエ解析結果

図-3　残響波形からの固有振動数算定

δ_{lim}＝L_b/1700で算定した。**図-1**に示すとおり乗り心地の限界値に対して十分に余裕がある結果であった。

3.2　構造物の安全性の確認

構造物の安全性を確認するため，設計たわみと実測たわみを比較した。実測たわみは換算たわみを用いており，設計たわみは使用性（乗り心地）の照査における設計値とした。実測値と設計値の比は**図-2**に示すとおり，ほとんどの桁で1.0を下回ったが，1.0を超える桁が1連あった。この桁は，設計たわみと実測たわみの両方が1mm以下であり，測定誤差や換算方法の影響によるものと考えられる。

たわみ測定の波形データのうち，列車通過後の自由振動波形に対してフーリエ解析を行い，桁の実測固有振動数を推定した（**図-3**）。

4．単純桁の衝撃係数

4.1　実測衝撃係数の算出

単純桁の計算上の1次モードの振動数（以下，「基本固有振動数」）n_0は，式（1）で算定される。

$$n_0 = \{\pi / (2 \cdot L_b{}^2)\} \times \sqrt{EI \cdot g / D} \qquad \cdots 式（1）$$

ここに，EIは桁の曲げ剛性，gは重力加速度，Dは単位長さ当りの死荷重である。

平成16年以降の単純桁の設計では，固有振動数を算定する際に，式（1）のEIに剛性補正係数kを乗じて補正した基本固有振動数（以下，「補正基本固有振動数」）を用いて衝撃係数を算出している。本章ではたわみ計測結果から実測衝撃係数を算出し，補正基本固有振動数を用いて設計衝撃係数を比較することで，剛性補正係数の妥当性について検討する。実測衝撃係数の算出は，260km/h走行時の実測たわみδ_{260}を静止状態の実測たわみδ_0で除し，1を減じて算出するのが望ましいが以下の算定手順にしたがって，静止状態に近い30km/h走行時のたわみδ_{30}を用いてδ_0を算出した。

「H16RC標準」では，単線載荷時の衝撃係数iを式（2）で算定する。

$$i = (1 + i_\alpha)(1 + i_c) - 1 \qquad \cdots 式（2）$$

ここに，i_αは速度効果の衝撃係数であり，速度パラメータα（$= v / 7.2nL_b$），車両長L_vとL_bの比からノモグラム[2]で求められる。vは設計速度(km/h)，nは桁の基本固有振動数(Hz)，L_bはスパン(m)である。

i_cは車両動揺の衝撃係数であり，式（3）で算定される。

$$i_c = 10 / (65 + L_b) \qquad \cdots 式（3）$$

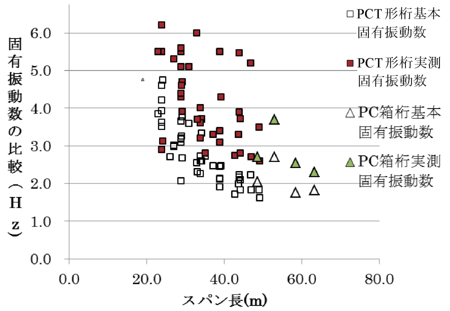


図-4　実測固有振動数と基本固有振動数

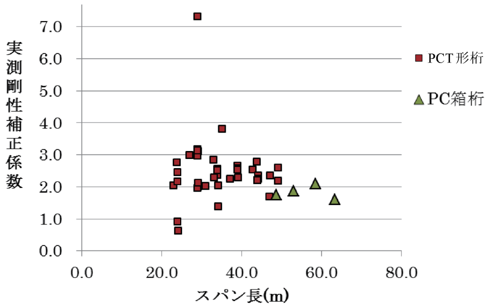


図-5　実測剛性補正係数

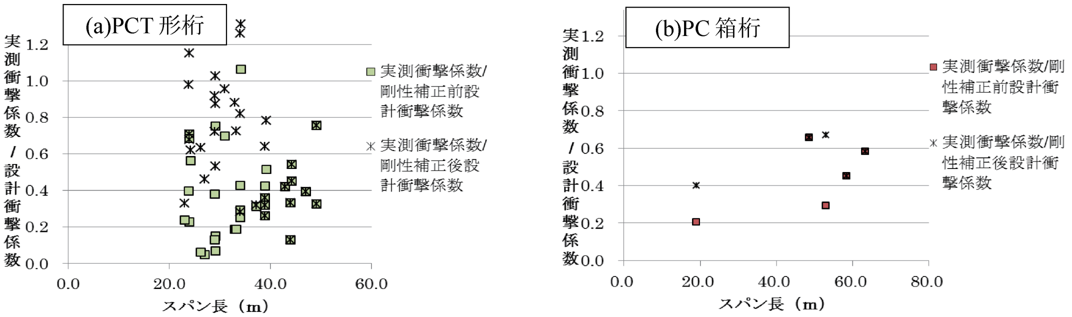


図-6　衝撃係数の実測値と設計値の比

「H16RC標準」によると，30km/h走行時の実測たわみδ_{30}には，式（3）で算定される車両動揺の衝撃係数 i_cが含まれるため，δ_{30}から静的たわみδ_0を算定するには換算が必要である。換算方法は，式（2）において，0km/h，30km/h走行時のi_αをそれぞれ$i_{\alpha_0}=0$，$i_{\alpha_30}=0$，iをそれぞれi_0，i_{30}とすると，$i_0=i_c$，$i_{30}=i_c$がえられる。$i_{30}=\delta_{30}/\delta_0-1=i_c$なので，$\delta_0=\delta_{30}/(1+i_c)$となる。したがって30km/h走行時の実測たわみ$\delta_{30}$から静的たわみ$\delta_0$を算定するには，近似的に$\delta_{30}$を$1+i_c$で割戻すこととした。

また，30km/h走行時はEAST-i，260km/h走行時はE2またはE7系による走行であり，30km/h走行時のEAST-iのたわみδ_{EI_30}をE2，E7系の静的たわみδ_{E_0}に変換する必要がある。変換方法は，前述の単純梁モデルに各車両を連行移動載荷し，支間中央に生じる最大たわみの比を用いて式（4）により算定した。

$$\delta_{E2_30}=\delta_{EI_30}\cdot(\delta_{E2}/\delta_{EI}),\ \delta_{E7_30}=\delta_{EI_30}\cdot(\delta_{E7}/\delta_{EI}) \quad \cdots 式（4）$$

ここに，δ_{EI_30}はEAST-iによる30km/h走行時の実測たわみ，δ_{E2}，δ_{E7}，δ_{EI}は単純梁モデルにE2，E7系，EAST-iを連行移動載荷したときの支間中央の最大たわみである。したがってδ_{E2_0}，δ_{E7_0}は，式（5）で算定され，260km/h走行の実測衝撃係数i_{E2_260}，i_{E7_260}は式（6）となる。

$$\delta_{E2_0}=\delta_{E2_30}/(1+i_c),\quad \delta_{E7_0}=\delta_{E7_30}/(1+i_c) \quad \cdots 式（5）$$

$$i_{E2_260}=\delta_{E2_260}/\delta_{E2_0}-1,\quad i_{E7_260}=\delta_{E7_260}/\delta_{E7_0}-1 \quad \cdots 式（6）$$

4.2　剛性補正係数の妥当性の検証

（1）固有振動数の比較

剛性補正係数の妥当性を検証するにあたり，基本固有振動数が剛性補正を行うことにより，実測固有振動数に近似するかを確認するため，3章で求めた実測固有振動数と補正前の基本固有振動数を比較した（**図-4**）。基本固有振動数には剛性補正は含んでおらず，主桁断面の剛性のみを考慮している。

また，実測固有振動数と基本固有振動数の比が桁剛性の違いによるものと考えると式（1）により，固有振動数の比を2乗したものが実測値と設計値の剛性の違い（剛性補正）と考えられる。実測剛性補正係数を**図-5**に示す。PCT形桁の剛性補正係数は2を中心に分布しており，PC箱桁はPCT形桁より小さい値ではあるが設計上の剛性よりも大きい。以上より，設計で考慮している剛性補正係数（PCT形桁は2，PC箱桁は1.5）は妥当な値といえる。ただし，PCT形桁のうち6連は，実測剛性補正係数が2を下

回った。このうち2連は走行速度が低く，ノイズの影響を受けたと考える。残る4連は実測固有振動数が基本固有振動数より小さいが波形に共振はなく，たわみが設計値より十分に小さいことから問題ないことを確認している。

（2）衝撃係数の比較

本検討では基本固有振動数と補正基本固有振動数を用いて設計衝撃係数は「H16RC標準」により，実測衝撃係数は式（6）により算出した。**図-6**に剛性補正前と後の設計衝撃係数に対する実測衝撃係数の比を示す。剛性補正係数を考慮しない場合，実測衝撃係数は設計衝撃係数の4割前後となっている桁が多い。一方，剛性補正係数を考慮した場合，実測衝撃係数は一部の桁を除き，設計衝撃係数の6～7割程度であった。以上のことから，剛性補正係数を考慮することで，より合理的な設計が行えたといえる。 ただし，PCT形桁でスパン35m以上の場合，剛性補正の有無によらず設計衝撃係数は，ほとんど変化しない結果であった。その要因について以下に考察を記す。

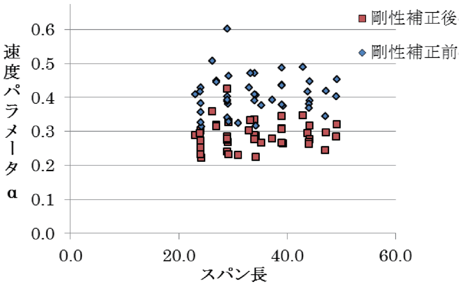


図-7　PCT形桁の速度パラメータ

PCT形桁の速度パラメータαを**図-7**に示す。αはスパンによらず剛性補正無しの桁は0.4程度，剛性補正有りの桁は0.3程度を中心に分布している。「H16RC標準」で衝撃係数を算出する場合，車両長を25mとするとスパン25～35m程度までは，速度パラメータが0.33～0.38を超えると衝撃係数が急激に大きくなる。そのため，剛性補正係数を考慮したことで固有振動数が増え，速度パラメータを低減する効果が敏感に生じたものと考える。一方，スパンが35mを超えると速度パラメータが0.22程度で衝撃係数が大きくなるため，剛性補正により，速度パラメータの低減がはかられても衝撃係数には反映されないと考えられる。したがって，剛性補正係数はスパン35m以下の桁では効果があるが，現況の剛性ではスパン35m以上の桁では効果が少ない結果になったと考える。

なお， PCT形桁では実測衝撃係数が剛性補正を考慮して算定した設計衝撃係数を上回る桁が4連あった（**図-6(a)**）。1連は，実測衝撃係数と設計衝撃係数の差は3%程度であり，誤差の範囲である。2連については静的たわみの実測値が1mm程度，活荷重作用時のたわみが1.5mmであり，たわみが小さいことから測定誤差などにより，衝撃係数を過大に評価したものと考えられる。残る1連は設計衝撃係数よりも実測衝撃係数が大きい結果であったが，波形データに共振傾向は見られず，実測たわみと設計たわみを比べても十分に小さいため，問題がないことを確認した。

固有振動数は剛性補正を考慮することで概ね一致するが，衝撃係数についてはばらつきが大きい。これは，低い速度で桁が共振する場合，速度向上に伴い，共振域を外れると本来は衝撃係数は下がるが「H16RC標準」では衝撃係数を下げず，当該速度までの最大となる衝撃係数を適用するため，測定速度が共振速度と異なる桁では差異が大きくなるものと考えられる。

５．まとめ

単純桁の設計に導入している剛性補正係数の妥当性の検証を行った結果，固有振動数の精度向上ならびに衝撃係数の精度向上に有効であることが確認できた。今後は連続桁に対する設計たわみについて検討結果を応用する考えである。

参考文献

1） 進藤良則，千葉寿，山洞晃一，石徳隆行：新幹線新規開業区間における単純PC桁のたわみ測定結果に関する考察，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2011
2） 下津達也，水谷哲也，舟竹弘次，進藤良則：北陸新幹線の桁たわみ測定結果に関する考察，第19回鉄道工学シンポジウム，2015（投稿中）