

論文 加速度・ひずみ測定に基づく鉄道 PC 桁の実剛性推定

徳永 宗正^{*1}・曾我部 正道^{*2}・後藤 恵一^{*1}・中田 裕喜^{*3}

要旨：鉄道 PC 桁を外ケーブル補強する場合、厳しい軌道変位管理に対して上反り量を制御するために、PC 桁のヤング率 E 、断面二次モーメント I の個々の情報を正確に推定する必要がある。このような背景から本論文では、PC 桁の E 、 I の推定手法を示すことを目的とし、加速度・ひずみ測定、シェル要素を用いた数値解析、および梁理論を組み合わせた手法を示した。経年 50 年程度の対象 PC 桁の、PC 部、RC 部の E は設計値より 25%、20% 程度大きいこと、 I は設計値より 60% 程度大きく、これは張出スラブ、排水勾配コンクリートに加えて、高欄断面の 30~40% 程度が寄与していることなどを明らかにした。

キーワード：PC 桁、ヤング率、断面二次モーメント、加速度測定、ひずみ測定、有限要素解析

1. はじめに

PC 桁の外ケーブル補強工法は、道路橋等において既に手法が確立されており、2007 年度までに 75 の補強事例が報告されているが¹⁾、鉄道橋に関してはこれまでに施工事例が報告されていない。この背景には、鉄道橋では、設計活荷重の改訂が行われていないこと、主ケーブルの破断事例が少ないこと等が挙げられるが、一方でグラウト不良に起因する PC 鋼線の破断も懸念されており、工法の適用性の検討が進められている。

高速鉄道の厳しい軌道変位管理に対して外ケーブル補強を適用する場合に懸念される PC 桁の上反り量を的確に制御するためには、PC 桁の実剛性および適切なプレストレス量を評価する必要がある。また、適切な補強プレストレス力を設計で算出するには、ヤング率、断面二次モーメントの個々の情報が必要となる。

実際に施工されたコンクリートは、圧縮強度、ヤング率ともに設計値より大きくなるのが一般的であり、また鉄道 PC 桁の断面剛性の設計計算においては、非構造部材である軌道スラブ、地覆、高欄等の影響は考慮されないため²⁾、施工の寸法誤差等も考慮すると実剛性は設計剛性より大きくなる。既往の測定結果によれば固有振動数は 0~40% 程度大きくなる場合が多いことが報告されている^{3~5)}。寸法誤差は、東北新幹線の RC 断面の統計分析によると、概ね 5mm 以下であり、桁の固有振動数には大きく影響しないレベルと考えられる⁶⁾。従って、桁の実剛性と設計剛性の差は、ヤング率、非構造部材剛性に主に起因していると考えられるが、それらの寄与度や影響を個々に分離して分析した事例はない。

以上のような背景から、本論文では測定から実 PC 桁のヤング率 E 、断面 2 次モーメント I を推定することを目的に以下の検討を行った。

(1) 加速度・ひずみ測定および有限要素解析等により、

実 PC 桁の E 、 I を推定する手法を提案する。

(2) 提案手法により対象 PC 桁の E 、 I を推定し、適用性を確認する。

2. 検討手法

2.1 対象 PC 桁

図-1 に対象 PC 桁の断面図を示す。対象 PC 桁は、単線並列の PC 単純 2 主桁で、スパン L は 14.3m、経年は 50 年程度である。本研究では、上り線側の 2 スパン分を対象とした（以下、それぞれの桁を A1、A2 という）。PC 桁は、主桁である PC 部と、桁間コンクリート、張出スラブの場所打ち RC 部、非構造部材である排水勾配コンクリート、RC 高欄から構成される。

2.2 測定手法

(1) 測定機材

表-1 に測定機器一覧を示す。本研究では、グラフィカルプログラム環境「LabVIEW」をベースとした加速度・ひずみの同期測定システムを構築し、測定に用いた。

(2) 設置方法

図-2 に 1 スパン分の桁の測定機器配置を示す。加速度計は桁下面に 36 個を、ひずみゲージは桁下面及び側面に 16 枚をそれぞれ配置した。桁側面のひずみゲージを用いて、スパン中央断面における、中立軸位置を把握する。

(3) 測定ケース

インパルスハンマーにより各加速度計位置を加振す

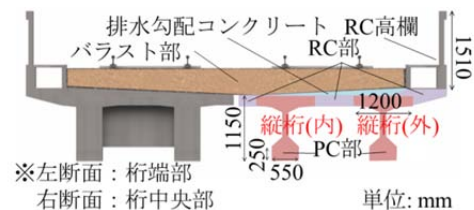


図-1 対象 PC 桁の断面図

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造力学 研究員 工修 (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造力学 室長 工博 (正会員)

*3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

方程式をモーダル変換する。得られる車両及び構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmark の平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣り合いが十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行った。解析に用いた Δt は、 10^{-5} 秒とした。

(5) 解析パラメータ

本解析では、PC 部ヤング率 ($26.5 \sim 40.0 \text{ kN/mm}^2$ の 6 通り)、RC 部ヤング率 ($30.0 \sim 50.0 \text{ kN/mm}^2$ の 6 通り)、バラスト部ヤング率 ($0.00265 \sim 2.65 \text{ kN/mm}^2$ の 25 通り) をパラメータとし、合計 900 ケースの解析を行った。

3. 検討結果

図-6 に本論文の検討フローを示す。3.1 では、加速度測定結果による固有振動モードの同定、ひずみ測定結果による最大応答ひずみの評価、中立軸の推定を行う。3.2 では、最大応答ひずみ、固有振動数の測定結果と解析結果が一致するように E を同定する。3.3 では、同定したヤング率に基づき、固有振動数が測定と梁理論とで一致するように I を推定する。同時に、測定から得られる中立軸との整合性を確認し、非構造部材の影響度を評価する。

3.1 測定結果に基づく固有振動モード、中立軸の推定

図-7 に上りの走行列車試験におけるスパン中央の応答加速度波形の例を示す。図中の番号は図-2 に示す加速度計番号に対応する。図から、2 本の縦桁で応答加速度に大きな差はなく、張出スラブで応答が大きくなっていることが確認できる。

表-2、図-8 に衝撃振動試験の応答加速度から同定した固有振動モード一覧及び振動モード形状を示す。縦桁鉛直 1 次モードの固有振動数は 9Hz 程度 ($80L^{-0.8}$) であり、PC 桁 A1, A2 で差はない。ヤング率を基準強度とし、非構造部材を考慮せずに梁理論により算出した固有振動数である 6.68Hz より、35%程度大きな値となっている。モード減衰比は PC 桁 A1 で 1%程度、A2 で 3%程度と、A2 の方が大きい結果となった。縦桁ねじり 1 次モード及び張出スラブ鉛直 1 次モードの固有振動数は A1 の方が若干大きく、それぞれ 13Hz 程度、16Hz 程度であった。

図-9 に中立軸位置同定フローを示す。中立軸は構造性能、特に桁を梁理論で考慮する場合の断面二次モーメントを表す指標として有効であり、かつひずみ分布の応答から測定することができると考えられる。静ひずみ測定の場合、一般的に断面内で中立軸の位置は変化しない一方、動ひずみ測定の場合、縦桁のねじりモード、張出スラブのモード等の変形モードの影響で、断面内のひずみ分布は静ひずみ分布とは異なるものとなる。加えて、動ひずみが小さい領域では基線ずれの影響が大きくなっ

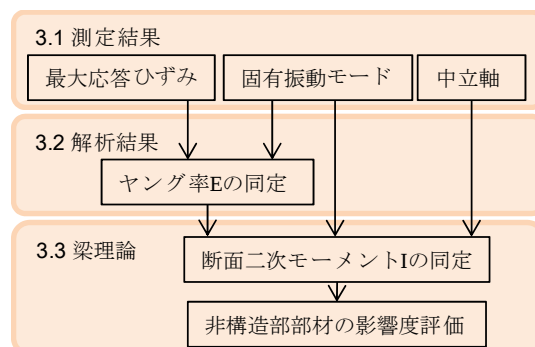


図-6 検討フロー

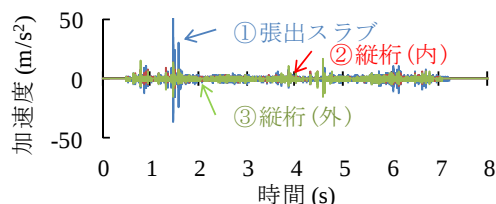


図-7 加速度測定波形の例

表-2 同定固有振動モード一覧

変形部材		固有振動数 f (Hz)			モード減衰比 ζ		
		平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
縦桁鉛直1次	A1	9.09	0.19	2%	0.012	0.013	106%
	A2	9.01	0.84	9%	0.033	0.013	38%
縦桁ねじり1次	A1	13.98	0.24	2%	0.030	0.019	62%
	A2	12.62	0.25	2%	0.023	0.013	55%
張出スラブ鉛直1次	A1	16.52	0.19	1%	0.021	0.008	40%
	A2	15.77	0.41	3%	0.024	0.010	44%

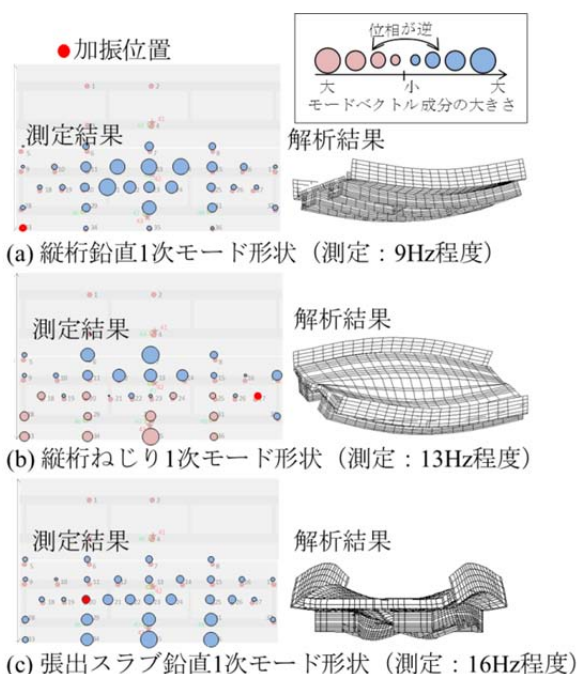


図-8 固有振動モード形状

て、中立軸位置の測定は難しくなることから、推定に際しいくつかの処理を施した。まず、図中 STEP1 は測定されたひずみの原波形の一例である。STEP2 は原波形に 0 線補正、ローパスフィルターを適用したものである。上

限振動数は加速度測定により同定した縦桁鉛直 1 次モードの固有振動数 $f_1 \times 1.2$ とした。STEP3 では応答ひずみから中立軸位置を時々刻々と算出する。縦軸である中立軸位置は、図-2 に示すようにハンチ下端を基準に下方向を正とし、応答ひずみを最小二乗法により直線補間した場合に補間直線関数の応答ひずみが 0 となる位置とを中立軸位置とした。応答ひずみが小さい領域では安定した値にならない。STEP4 では補間直線関数と鉛直方向に配置した 7 点の測定応答ひずみの一致度を相関係数により表し、相関係数が 0.95 以上の時刻のデータのみを抽出した。STEP5 は各走行列車試験で抽出した中立軸位置の値と、スパン中央の応答ひずみの関係をプロットしたものである。図からひずみ振幅が増加するほど、中立軸位置の値は小さくなっており一定の値に収束する傾向があることが確認できる。本研究の範囲では、値がほぼ収束する応答ひずみが 10μ 程度以上のデータの平均値を最終的な中立軸位置として同定した。測定の結果、PC 桁 A1、A2 共に、縦桁(外)の方が縦桁(内)より 180mm 程度中立軸が上にあることが確認できる。これは桁の外側に存在する張出スラブ、高欄の影響と推定され、設計では考慮していない非構造部材が負担する応力の存在が確認できた。PC 桁 A1、A2 を比較すると、PC 桁 A1 のほうが PC 桁 A2 より 10~20mm 程度中立軸位置が下にあることが明らかとなった。

図-10 に各走行列車試験におけるスパン中央の最大応答ひずみを示す。図中の横線は平均値である。上り列車走行時に最大応答ひずみが $15 \sim 20\mu$ 程度であるのに対し、下り列車走行時には $2 \sim 5\mu$ と上下線走行時で大きく値が異なる。これは、対象 PC 桁が単線並列 2 主桁タイプであり、構造上バラストのみで左右の桁が接続されているためと考えられる。上り線、下り線の構造が対象であるため、下り線通過時の上り線挙動は上り線通過時の下り線挙動と等しいと考えられる。荷重分担率を縦桁毎の最大応答ひずみの比率とすると、A1 で $0.41:0.44:0.10:0.05$ 、A2 で $0.43:0.37:0.14:0.06$ であった。

3.2 解析結果に基づくヤング率の推定

図-11 にパラメータ解析結果一覧を示す。(c)は本解析でパラメータとした PC 部、RC 部、バラスト部のヤング率、(b)は各ケースの固有値解析から得られる縦桁鉛直 1 次モード、縦桁ねじり 1 次モード、張出スラブ鉛直 1 次モードの固有振動数である。固有振動モード形状は図-8 に示した通りである。(a)は各ケースの時刻歴解析から得られる 4 本の主桁のスパン中央の最大応答ひずみである。これらの図より、各部材のヤング率の増加と共に固有振動数は増加し、最大応答ひずみが減少していることが確認できる。バラスト部のヤング率は $0.00265 \sim$

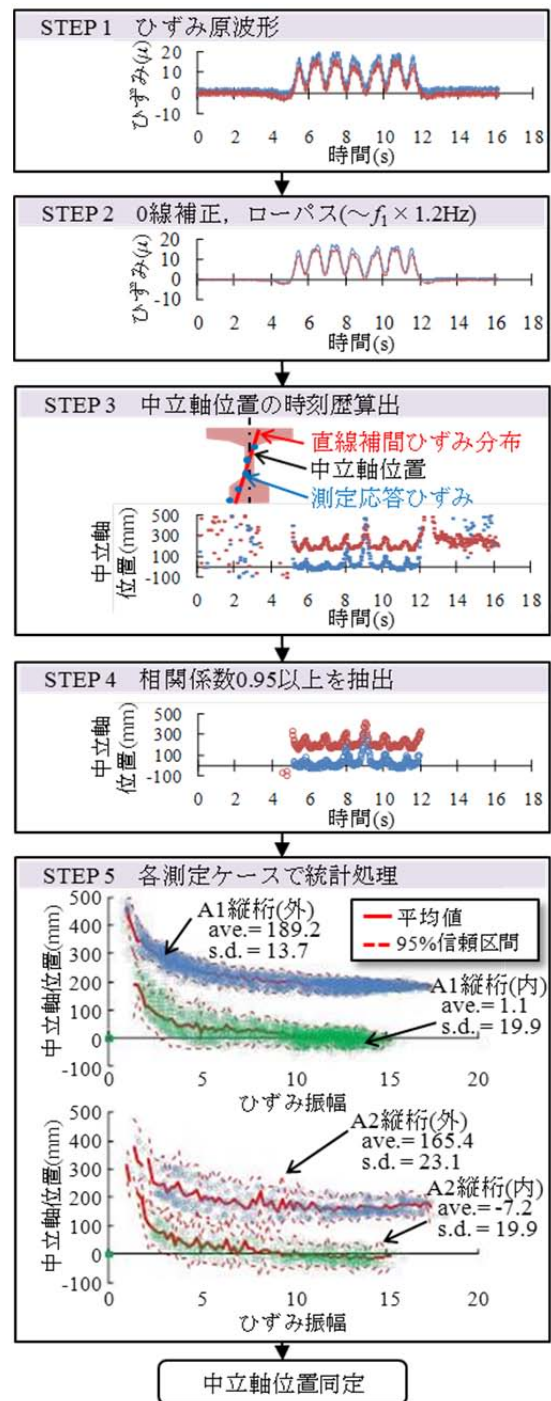


図-9 中立軸位置同定フロー

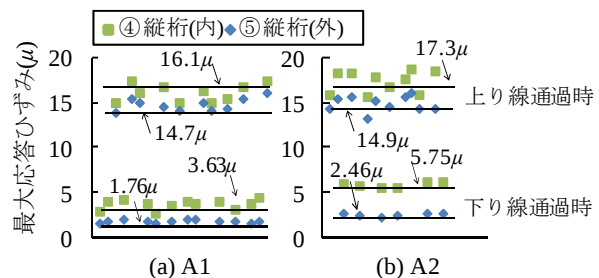


図-10 最大応答ひずみ

2.65kN/mm^2 のように小さい値の範囲のパラメータとしたが、固有振動数や最大応答ひずみの変化は大きく、影響度が大きいことが確認できる。

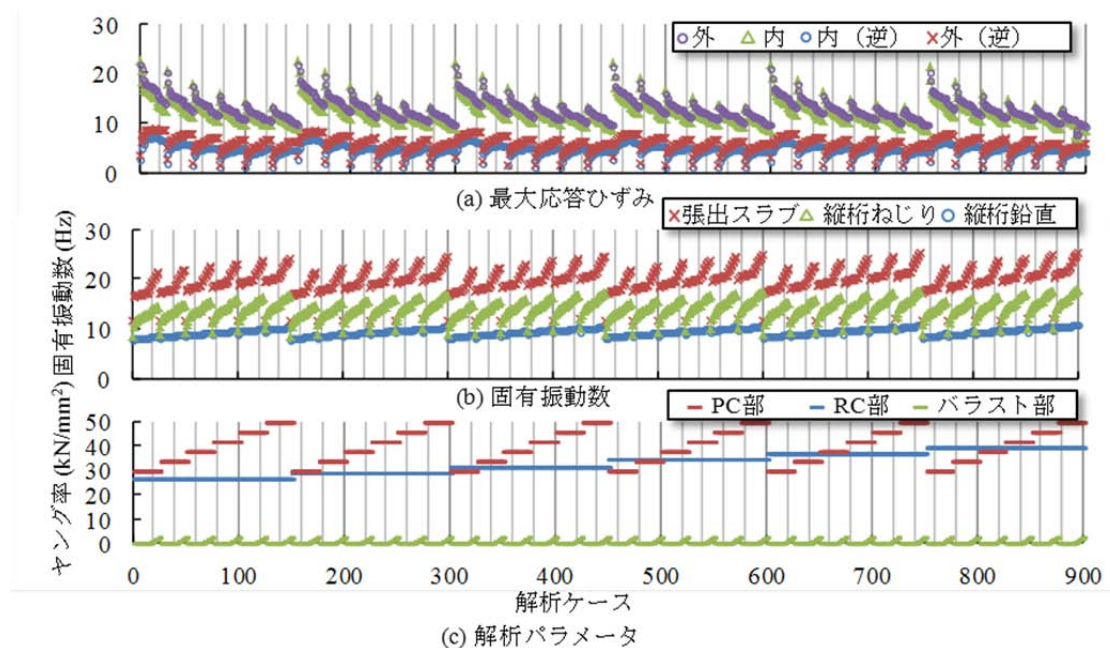


図-11 パラメータ解析結果一覧

上記の固有振動数，最大応答ひずみが 3.1 の測定結果と一致するようにパラメータであるヤング率を決定した。図-12 にヤング率推定フローを示す。測定結果と解析結果の一致度を評価するにあたり，式(1)～式(3)に示す3つの指標，荷重分担率一致度 I_1 ，最大応答ひずみ一致度 I_2 ，固有振動数一致度 I_3 を用いた。図のフローに基づいた検討の結果，上位抽出数 n が 10 程度で候補解析ケースが 1 ケースとなり， n を 10 程度以下にした場合， I_1 ， I_2 ， I_3 全てで上位 n 個を満たす解析ケースは存在しなかった。

$$I_1 = \frac{(\bar{\epsilon}_a / \bar{\epsilon}_a) (\bar{\epsilon}_m / \bar{\epsilon}_m)}{\sqrt{(\bar{\epsilon}_a / \bar{\epsilon}_a) (\bar{\epsilon}_m / \bar{\epsilon}_m)}} \quad (1)$$

$$I_2 = |\bar{\epsilon}_m - \bar{\epsilon}_a| \quad (2)$$

$$I_3 = |\bar{f}_m - \bar{f}_a| \quad (3)$$

ここに， $\bar{\epsilon}$: 4 本の主桁のスパン中央の最大応答ひずみから形成されるベクトル， $\bar{f}$: 縦桁鉛直 1 次モード，ねじり 1 次モード，張出スラブ鉛直 1 次モードの固有振動数から形成されるベクトル（添字 a は解析結果， m は測定結果）

表-3 に，ヤング率の推定結果を示す。RC 部のヤング率は 30kN/mm^2 程度であり，設計値である 24kN/mm^2 より 25% 程度大きい結果であった。PC 部のヤング率は 38kN/mm^2 程度であり，設計値である 31kN/mm^2 より 20% 程度大きい結果であった。バラスト部のヤング率は 0.01kN/mm^2 程度の結果となった。土のヤング率は N 値が 5 で 0.01kN/mm^2 程度， N 値が 50 で 0.1kN/mm^2 程度であることから，本解析で推定したバラスト部のヤング率は軟弱地盤の土と同程度と非常に小さいことが分かる。これは，本解析ではバラスト間の空隙，接触やバラスト，スラブの間の滑りを考慮しておらず，それらの影響を含んだ結果としてヤング率が推定されたためと考えられる。

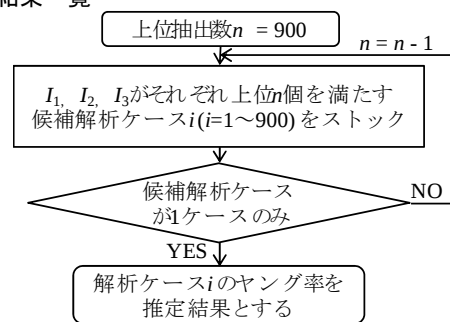


図-12 ヤング率推定フロー

従って，梁理論等でバラスト／スラブ間の滑りを考慮せず断面保持の仮定で剛性を考慮する場合，バラスト部は 0.01kN/mm^2 程度のヤング率を想定しておけば良いと考えられる。

3.3 梁理論に基づく断面二次モーメントの推定

シェル，ソリッド要素等を用いた数値解析では非構造部材の影響を考慮することが可能であるが，実設計では梁要素を用いる場合が多く，高欄等の非構造部材の剛性をどの程度見込めばよいのか明確になっていない。そこで，推定したヤング率を用いて，梁理論を適用した場合の非構造部材剛性の影響度を，桁を 1 本の梁でモデル化する場合で評価する。

図-13 に非構造部材が桁の鉛直 1 次モードに及ぼす影響，表-4 に PC 桁断面を 1 本の梁と仮定し算出した固有振動数 f ，断面二次モーメント I ，中立軸位置を示す。ヤング率は 3.2 の数値解析により推定した値を用いた。バラストのヤング率は感度が小さかったため 0 とし，重量のみを考慮した。断面内の各部材の断面 2 次モーメントに乗じる係数をパラメータとした。表及び図から，設計断面である PC 部と中間スラブのみを考慮した設計断

表-3 ヤング率 E の推定結果

		RC部	PC部	バラスト部
基準強度 (N/mm ²)	設計値	24.0	40.0	-
	設計値	25.0	31.0	-
ヤング率 (kN/mm ²)	同定値 A1	31.8	38.0	0.01325
	同定値 A2	29.2	38.0	0.02650

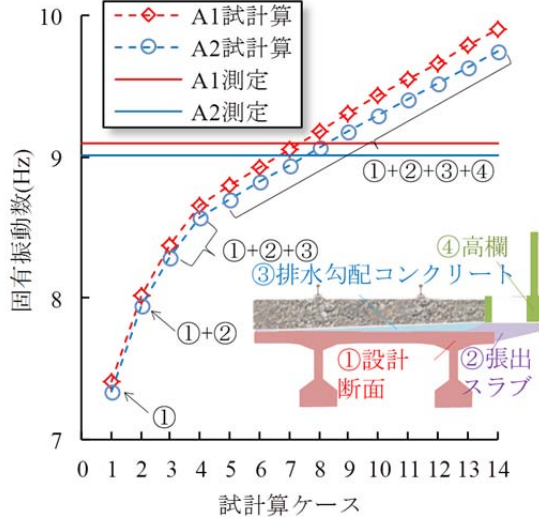


図-13 非構造部材が固有振動数に及ぼす影響

表-4 断面二次モーメント I の推定結果

ケース	断面二次モーメントに乘ずる係数				A1 (9.09Hz)			A2		
	①	②	③	④	f (Hz)	I (m ⁴)	中立軸 (mm)	f (Hz)	I (m ⁴)	中立軸 (mm)
	測定値				9.09	-	1, 189	9.01	-	-7, 165
1	1	0	0	0	7.41	0.199	195	7.34	0.199	203
2	1	1	0	0	8.02	0.237	137	7.95	0.238	144
3	1	1	0.5	0	8.37	0.260	103	8.29	0.261	112
4	1	1	1	0	8.65	0.279	73	8.57	0.280	83
5	1	1	1	0.1	8.79	0.289	69	8.69	0.290	79
6	1	1	1	0.2	8.92	0.298	65	8.82	0.299	75
7	1	1	1	0.3	9.05	0.308	61	8.94	0.309	71
8	1	1	1	0.4	9.18	0.318	57	9.06	0.319	67
9	1	1	1	0.5	9.30	0.327	53	9.18	0.328	63
10	1	1	1	0.6	9.43	0.336	49	9.30	0.338	60
11	1	1	1	0.7	9.55	0.346	45	9.41	0.347	56
12	1	1	1	0.8	9.67	0.355	41	9.52	0.356	52
13	1	1	1	0.9	9.78	0.364	37	9.63	0.366	48
14	1	1	1	1	9.90	0.373	33	9.74	0.375	44

面の場合は、固有振動数が実測より 20%程度小さく、中立軸位置は 200mm 程度と実測より下方に位置する。張出スラブや排水コンクリートの断面を考慮したケース 2～4 の場合でも、固有振動数は 8.6Hz と実測には届かない。張出スラブ、排水コンクリート、高覧の断面を同時に考慮した 14 の場合、固有振動数は 10Hz 程度と実測を上回り、高覧の断面二次モーメントの乗ずる係数を 0.3～0.4 にすることで実測と概ね一致した。この時、中立軸位置は 60～70mm であり、実測結果である 0, 180mm の間となる事が確認できる。以上から、対象 PC 桁の断面二次モーメントは設計値より 50～60%程度大きいと推定され、これは張出スラブ、排水勾配コンクリートを全て考慮、高覧を 30～40%程度考慮した剛性に相当する。

4. まとめ

本論文では既設の PC 桁の振動・ひずみ測定に基づき、実剛性 EI の E 及び I を定量的に評価することを目的に検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 加速度・ひずみ測定の結果と有限要素解析の結果の一致度を、荷重分担率一致度、最大応答ひずみ一致度、固有振動数一致度の 3 つの指標に着目することで、実 PC 桁のヤング率を同定する手法を示した。
- (2) 上記手法で同定したヤング率と梁理論に基づき、固有振動数の一致度から、実 PC 桁の断面二次モーメントを同定する手法を示した。
- (3) 対象 PC 桁の PC 部のヤング率は設計値より 25%程度大きく、RC 部のヤング率は設計値より 20%程度大きい結果を得た。また、対象 PC 桁の断面二次モーメントは設計値より 60%程度大きいと推定され、これは張出スラブ、排水勾配コンクリートを全て考慮、高覧を 30～40%程度考慮した剛性に相当する。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル（案）[改訂版]，2007
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物，丸善，2004.4
- 3) 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
- 4) 松本光矢，曾我部正道，谷村幸裕，渡辺勉：開床式高架橋の動的特性と高速鉄道への適用性に関する検討，鉄道力学論文集，No.13，pp.70-76，2009.7
- 5) 進藤良則，千葉寿，山洞晃一，山洞晃一：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論文集，pp.203-208，2011.10
- 6) 小出英夫，尾坂義夫：コンクリート構造の部材安全係数の決定に関する研究，土木学会論文集，No.422/I-14，pp.245-254，1990
- 7) 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