

プレストレストコンクリートT桁橋の振動計測（計測手法に関する検討）

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 小林 崇
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 荒田 成一
 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 花井 拓
 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 木村 嘉富

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下，PC）の維持管理における課題の一つとして，劣化が著しく進行したPC構造物の耐荷力を如何に的確に効率良く把握するかが挙げられる。そこで，PC構造物の耐荷力評価手法の一つとして，非破壊かつ簡易な手法で行える振動計測に着目し，実際に供用されているPC橋を対象にその適用性を追求する。本稿ではPC T桁橋を対象に主に振動計測手法に関する報告を行う。なお，PC T桁橋はT型のプレキャスト桁を用いた多主桁橋であり，通常，横桁や床版間詰め部等の場所打ちコンクリート施工と横方向のプレストレス導入により主桁を一体化することで格子構造として挙動するように設計される。

2. 対象PC橋の概要

対象PC橋の諸元を表-1に，全景を写真-1に示す。本橋は1967年に建設されたPC 5径間単純ポストテンション方式T桁橋であり，各径間とも支間長，幅員および主桁形状が等しい。架橋地点が日本海沿岸の海岸線に近接し，厳しい塩害環境に長く曝され，耐久性に優れるPC橋といえども劣化が顕著となった（写真-2参照）。このため橋の架替えが計画され，本橋は2010年9月に供用が停止された。

PC桁は下フランジを中心にPC鋼材の腐食とこれに伴うコンクリートのひび割れや浮きが多数の主桁に生じていた（表-2）。径間別では第1・4・5径間，主桁別ではG3桁の損傷度が相対的に高い。

3. 振動計測の概要

対象PC橋は上述の1橋のみであるが，各径間とも構造が同一でかつ比較的健全な径間と著しく劣化した径間が混在するため，振動特性を径間毎に相对比较できる。ただし，計測時には橋の解体作業が着手され，第3～5径間の舗装が撤去されていた。また，第3径間は床版が切断されていたため，この径間を除く4径間に対し以下の方法にて振動計測を実施した。

(1) 加振方法

加振方法は，車両落下法，重錘落下法および常時微動法の3方法とした。各加振方法の詳細は表-3に示す通りであり，いずれも簡易な手法で行える。

表-1 対象PC橋の諸元

橋種	PC道路橋（一等橋）
形式	B.B.R.V方式 ポストテンションT型単純桁（5連）
橋長	140.5m（各スパン27.3m）
幅員	全幅員8.8m 有効幅員8.0m
斜角	直
設計基準強度	プレキャスト桁 400kg/cm ² 場所打ち 300kg/cm ²

注）諸元の表記は竣工図に従った。



写真-1 対象PC橋の全景





写真-2 PC桁の劣化状況

表-2 PC桁の損傷度（2007年時点）

主桁番号	径間番号				
	第1	第2	第3	第4	第5
G1	A		C	C	C
G2				C	C
G3	B	B	B	C	A
G4	C	C		A	
G5	C			C	B

損傷度A・B・C：主桁下フランジコンクリートの浮きが連続して5m，2m，1m以上連続した箇所のあるもの。

表-3 加振方法の概要

	車両落下法	重錘落下法	常時微動法
加振方法	<p>本検討では、重量 111kN の車両を用い後輪 4 輪を高さ 130mm の段差より落下させ、橋を強制的に加振させる。</p> 	<p>本検討では、質量 0.245kN の重錘を用い高さ 1.0m から自由落下させ、橋を強制的に加振させる。衝撃加振力は約 30kN である。</p> 	<p>本検討では、隣接する仮橋の交通が途切れた静穏時の振動を取得する。</p> <p>橋梁の周辺には、自然的・人工的な原因により常時微動が存在し、これによって橋は常に微小なランダム振動をしている。</p>
利点	<p>特別な加振装置を必要とせず、試験車両があればよい。比較的大きな加振力が得られる。</p>	<p>小型の重錘であれば、人力による加振が可能である。比較的一定の加振力が得られる。</p>	<p>加振が不要で、供用中の橋梁でも簡便に測定することができる。</p>
欠点	<p>車両の重量が付加質量として無視できない場合がある。また、車両自身の固有振動(ダンプトラックは約 3Hz)が加振力として卓越する場合がある。</p>	<p>重錘の質量によっては十分な加振力を得られない場合がある。</p>	<p>特性の良い振動計測機器が必要である。微振動であるためノイズ等の混入やデータ処理方法の影響を受けることがある。</p>

注) 本表は、文献 1) を参照して整理した。

ただし、車両落下法と重錘落下法については、供用中の PC 橋の場合、一時的な交通規制が必要となる。

(2) 計測方法

振動計測は、橋面上に鉛直方向に設置したサーボ型加速度計から得る出力を調整後、サンプリング周波数 1kHz でデジタル変換してパーソナルコンピュータに取り込み、FFT 解析を行った。また、計測点は径間 1/2 点の各主桁の直上とし、加振点を移動させながら計測を実施した(図-1 参照)。加振点は径間 3/8 点(加振点イ)、径間 1/2 点(加振点ロ・ハ・ニ)、径間 1/4 点(加振点ホ)にできる限り近づけた。ただし、車両落下法の加振点ロ・ハ・ニについては径間 1/2 点から 1.5m 離れた。

4. 振動計測の結果および考察

4.1 計測点・加振点に関する検討

図-2 は、車両落下法にて計測された加速度波形を整理したものである。これより、a・b 図とも振動波形としては概ね相似形になることがわかる。また、a 図に示した加振点二における最大加速度に着目すると、各計測点とも 70~75cm/s² であり、計測点の差異は小さい。一方、b 図に示すように計測点 1 では、加振点八のように外桁側で加振させた場合に最も振動するなど、加振点を移動させると最大加速度が変化した。

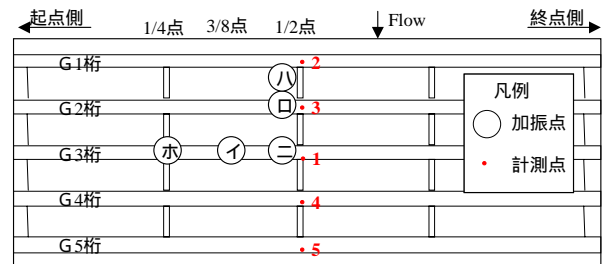
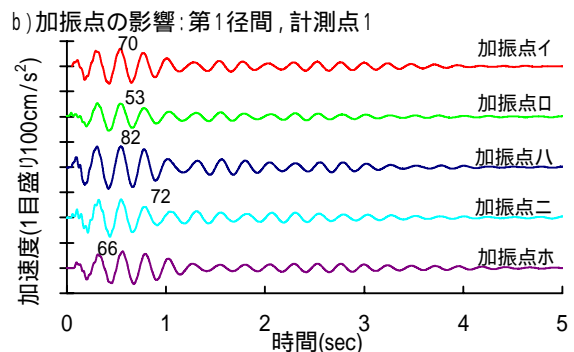
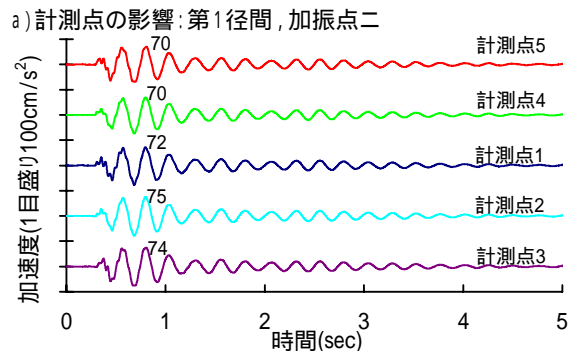


図-1 計測点および加振点



注) 図中の数値は最大加速度を示す。

図-2 加速度波形一覧(車両落下法)

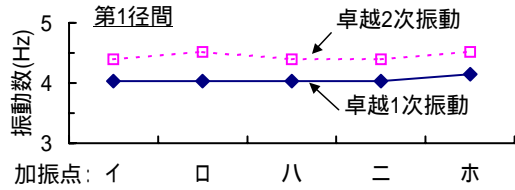


図-3 卓越振動数 (車両落下法)

図-3は車両落下法により得られた加速度波形をもとに解析し、加振点を变化させた場合の卓越振動数を整理した結果である。これより、卓越1・2次振動数とも加振点によらず概ね一致する結果が得られた。また、図-2・3に示した結果は第1径間のもので、この径間は本橋の中でも損傷度が相対的に高い径間であるが、この場合においても格子構造としての挙動を示したと判断される。

4.2 加振方法に関する検討

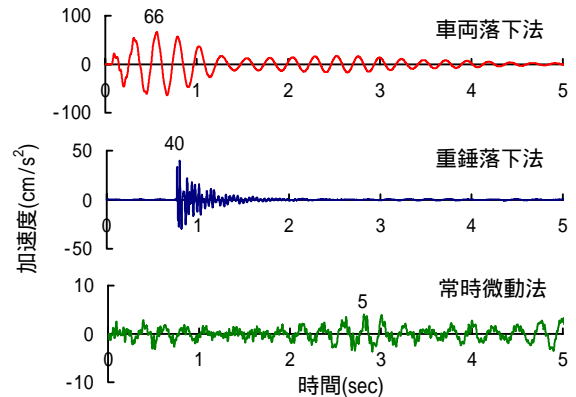
図-4は各加振方法の加速度波形の一例を示したものである。これより、振動波形は車両落下法と常時微動法が1秒間に4~5回程度の卓越した振動が見られ、重錘落下法はそれより細かく振動していることがわかる。また、このケースにおける最大加速度は、車両落下法 $66\text{cm/s}^2 >$ 重錘落下法 $40\text{cm/s}^2 >$ 常時微動法 5cm/s^2 の順となった。

図-5は、図-4の波形データをもとにFFT解析を行って求めたスペクトルグラフである。これより、卓越振動数は車両落下法と常時微動法で4~6Hz程度に集中し、重錘落下法ではこれ以外に20~40Hz程度にも現れた。卓越1次振動数は、第1径間の加振点ホの場合、重錘落下法 $4.3\text{Hz} >$ 車両落下法 $4.2\text{Hz} >$ 常時微動法 3.8Hz の順となり、加振方法による若干の差異が確認された。

また、車両落下法の卓越1次振動数は、第1径間の加振点イ~二で 4.0Hz と加振点ホより小さい値となっている(前出図-3参照)。これは、加振点ホの車両落下地点が径間1/4点であるのに対し、加振点イ~二は径間1/2点あるいは径間3/8点と支間中央側で加振を行うことで表-3中の欠点として挙げられる車両重量等の影響が現れたと考えられる。

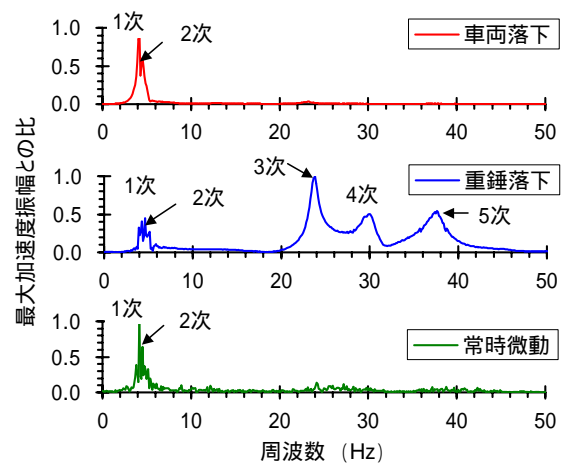
4.3 PC桁の劣化損傷の影響について

表-4は、加振点を二とホに絞り、各径間の卓越振動数を車両落下法により確認した結果である(参考として各径間の最大加速度を図-6に示す)。



注) 第1径間の加振点ホ, 計測点1の結果を示した。図中の数値は最大加速度を示す。

図-4 加振方法別の加速度波形

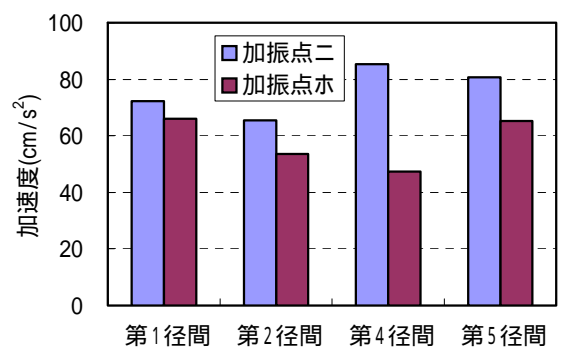


注) 第1径間の加振点ホ, 計測点1の結果を示した。

図-5 加振方法別のスペクトルグラフ

表-4 各径間の卓越振動数 (車両落下法)

径間番号	卓越振動数(Hz)				舗装の有無
	加振点二		加振点ホ		
	1次	2次	1次	2次	
第1	4.0	4.4	4.2	4.5	有
第2	4.0	4.4	4.2	4.6	
第4	4.3	5.0	4.4	5.6	無
第5	4.3	5.0	4.4	4.9	



注) 計測点1の結果を示した。

図-6 各径間の最大加速度 (車両落下法)

表-5 単純支持梁の1次固有振動数の解

項目	記号	単位	舗装有り	舗装無し
弾性係数	E	N/m ²	3.5E+10	
断面2次モーメント	I	m ⁴	0.1409	
断面積	A	m ²	0.738	0.600
単位重量	w	N/m ³	24500	
重力加速度	g	m/s ²	9.80665	
単位長さ当りの質量	m	Ns ² /m ²	1844	1499
スパン	L	m	27.3	
ω_n	ω_n		3.14	
円振動数	ω_n	rad/s	21.7	24.0
固有振動数	f_1	1/s(Hz)	3.45	3.82

注) 固有振動数は、両端単純支持梁のn次の固有円振動数が式(1)の関係があることより求めた。ここで、コンクリートの弾性係数は建設時の基準を参照し、断面2次モーメントは主桁コンクリートのみを考慮（支間中央断面で一定）、断面積（質量にかかる）は舗装や地覆等の橋面部を各主桁に等分されるものと仮定した。

$$\omega_n = 2 f_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EIg}{wAL^4}} \quad \text{式(1)}$$

第1・2径間に着目すると、第2径間は本橋の中でも損傷度が相対的に低い径間であるが、損傷度が相対的に高い第1径間で得られた卓越1・2次振動数と概ね一致し、損傷度の違いを捉えることができなかった。また、第4・5径間は、第1・2径間と比べ卓越1・2次振動数とも高くなった。これは、舗装の有無が影響していると考えられる（表-5参照）。

表-6は、高次の卓越振動が得られた重錘落下法の計測結果である。第1径間と第2径間との卓越振動数の比率（f1/f2）に着目すると、実測された3～5次の卓越振動ではいずれも損傷度が相対的に高い第1径間の卓越振動数が小さくなる（主桁剛性が低下していると考えられる）傾向を示した。

なお、今回確認された卓越1次振動数は、各加振方法とも表-5に示す解を大きく上回る結果となった。これについては、アスファルト舗装や地覆コンクリートの剛性寄与や、支承が写真-3のように著しく腐食することで主桁の支持条件が解の算定条件と異なったこと等が影響していると考えられる。

5.まとめ

今回実施したPCT桁橋の振動計測より、以下のことが確認された。

- (1) 車両落下法により得られた加速度波形はいずれも概ね相似形となり、卓越振動数は計測点や加振点によらず概ね一致した。このことは、本橋が格子構造としての挙動を示したためと判断される。
- (2) 同一の加振点・計測点にて車両落下法、重錘落下法および常時微動法による振動計測を実施した結果、得られる振動特性は加振方法によって異なる場合があった。
- (3) 車両落下法や常時微動法では4～6Hz程度の卓越1・2次振動が確認されたが、径間毎の卓越振動数の変化は認められなかった。一方、重錘落下法では20～40Hz程度の高次の卓越振動が確認され、このうち3～5次の卓越振動数は損傷度が相対的に高い径間側で低下する傾向を示した。

【謝辞】

本検討は著者らが所属する両機関における「撤去橋梁（PC橋）を用いた臨床研究に関する協力協定」の活動の一環として行った。また、計測にあたっては国土交通省北陸地方整備局並びに同局高田河川国道事務所に多大な協力を得た。関係各位に深く感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，pp.7-13，1993.10

表-6 重錘落下法による振動計測結果

振動次数	卓越振動数(Hz)		f1/f2
	第1径間 f1	第2径間 f2	
1次	4.3	4.3	1.00
2次	4.6	---	---
	---	14.4	---
3次	23.7	25.2	0.94
4次	30.2	31.5	0.96
5次	37.1	40.8	0.91

注) 加振点ホ，計測点1の結果を示した。



写真-3 支承の状況