

プレストレストコンクリートT桁橋の振動計測 (解析手法に関する検討)

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○北野 勇一
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 谷口 秀明
 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桁橋を対象に実施した振動計測をもとに、主に振動解析手法に関する報告を行う。

2. 振動計測の概要

2.1 対象PC橋について

対象PC橋は1967年に建設された橋長140.5mのPC 5径間単純ポストテンション方式T桁橋である。直橋で、各径間とも支間長、幅員構成、主桁形状が等しい (図-1 参照)。設計活荷重はTL-20、主桁の設計基準強度は40N/mm²である。

2.2 計測手法について

対象PC橋の中でも比較的健全と考えられる第2径間に対し、以下の方法にて振動計測を実施した。

加振方法は重錘落下法とした。この方法では質量0.245kNの重錘を高さ1.0mから自由落下させ、橋を強制的に加振させる (写真-1)。衝撃加振力は約30kNとなる。

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、加振点は幅員中央G3桁直上の径間1/2点 (加振点ニ) と径間1/4点 (加振点ホ) とし、計測点1を不動点にG1桁およびG5桁上の計測点を5点ずつ移動させながら振動計測を実施した (図-2 参照)。

2.3 計測結果について

図-3は、実測された加速度波形の一例である。最大加速度は径間1/2点の計測点2で57cm/s²が観測された。また、径間1/8点である計測点5においても47cm/s²となった。

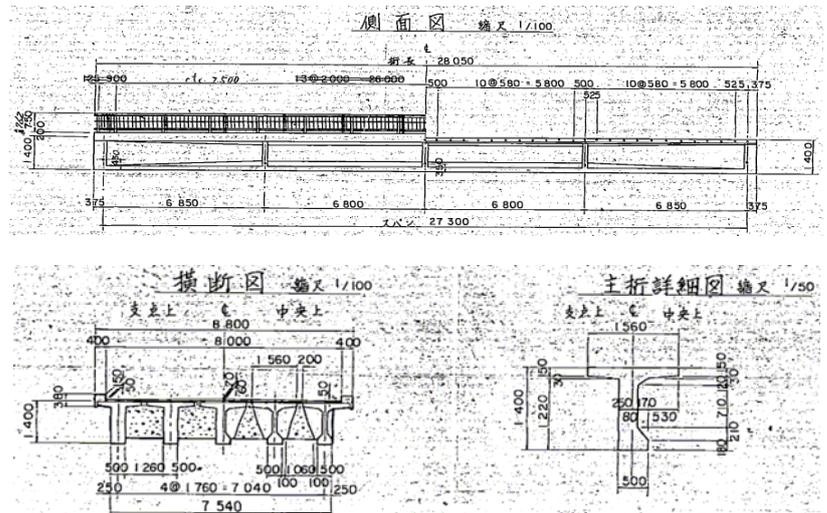


図-1 対象PC橋の竣工図



写真-1 加振状況

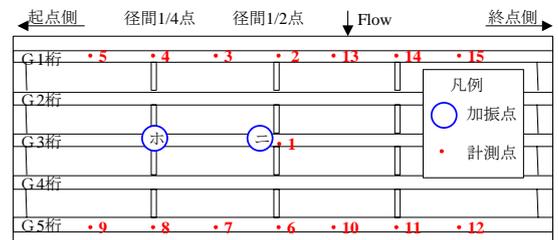
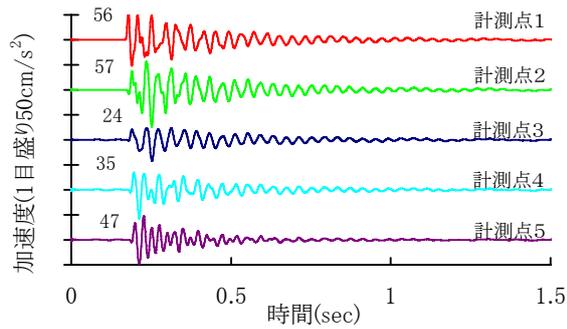


図-2 計測点および加振点



注) 図中の数値は最大加速度を示す。

図-3 加速度波形 (加振点二)

図-4は、加速度波形よりFFT解析を行って求めたスペクトルグラフである。卓越振動は4~40Hz程度の範囲で1~5次のものが確認された。卓越振動数としては2次と3次が加振点により異なった。

図-5は、振動計測より確認された振動モードの一例である。図には後述する固有値解析より得られた振動モード形状を併記した。これより、卓越1次振動は曲げ1次、卓越4次振動が曲げ3次の振動モードであると判断される。しかし、それ以外の振動モードは確定できず、計測点を増加する等の是正が必要であった。

3. 振動解析手法に関する検討

振動計測より得られる振動特性としては、2.3節に示した固有振動数(計測結果では卓越振動数と呼称)や振動モード、減衰などが挙げられる。このうち、固有振動数は、構造物の全体的な剛性を表すことから、評価手法として最も一般的に用いられる。その中でも、本稿では鉛直方向の曲げによる固有振動数を評価の対象とする。

3.1 一般的な算定手法に関する確認

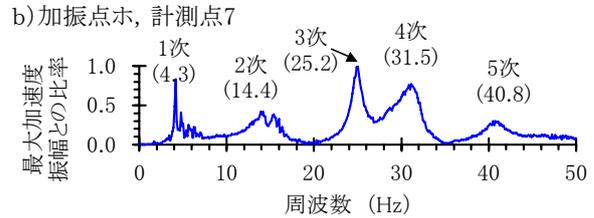
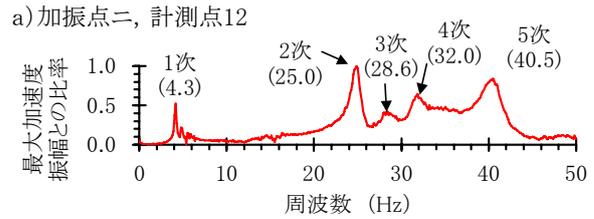
一般的な算定手法とは3次元の構造物を1・2次元の構造として取り扱うことと定義する。これにより、設計に要する労力や時間が省かれる。一方、設計条件の一部も省略されることに注意を要する。

(1) 算定手法および算定結果

表-1は、一般的な算定手法を用いて固有振動数を求めた結果である。ケース1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固有振動数を求めたものである。

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

ケース2~6はFEMモデルにより固有振動数を求めたもので、ケース2・3は一本梁モデル、ケース4~6は平面骨組みモデルとした。また、市販FEM解析ソフトを用い、ビーム要素で構築したモデルをピンローラーの単純支持のもと解を求めた。この際、アスファルト舗装と地覆コンクリート



注) 括弧内の数値は卓越振動数(Hz)を示す。

図-4 スペクトルグラフ

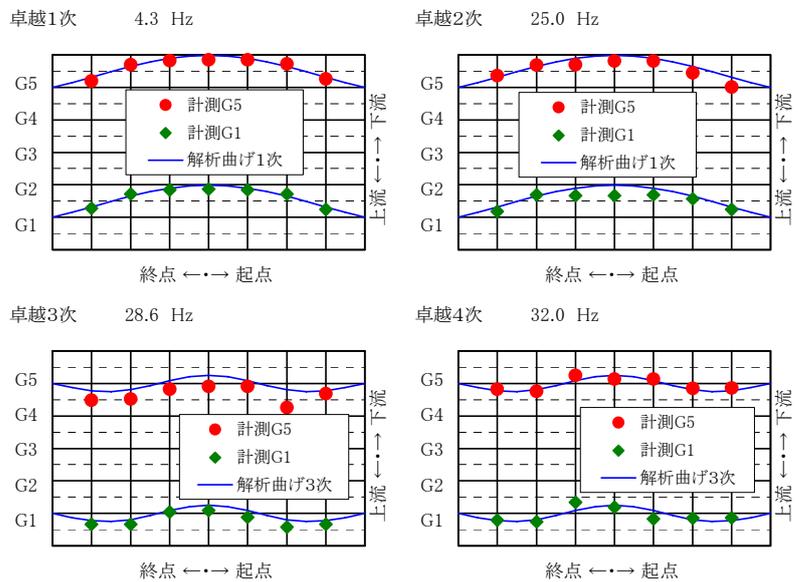


図-5 振動モード (加振点二)

等の橋面部はその質量を考慮した(各主桁に等分した)が、剛性は無視した。主桁コンクリートの弾性係数は建設時の基準より35kN/mm²と仮定した。

(2) 算定結果に対する考察

ここでは、ケース1の理論式の解とケース2~6のFEMモデルの解とを対比する。

ケース2・3は一本梁モデルで橋軸方向部材の質点数をそれぞれ9・17とし、横桁を無視することでケース1の算定条件と一致させた。その結果、ケース2・3とも理論式の解を概ね再現できた。

次に、平面骨組みモデルとしたケース4~6の算定結果について述べる。ケース4・5は一本梁モデルの算定条件と一致させるため、横桁の剛性を考慮するが自重は無視した。その結果、質点数17としたケース5は一本梁モデルの算定値と一致した。一方、質点数9のケース4は曲げ3次が出現しないなど、高次の振動モードになると一本梁モデルを再現できなかった。また、ケース6はケース5に比べ各固有振動数とも3.3~3.4%ほど低下しているが、これは横桁の自重を考慮したためである。

(3) 計測結果との対比

実測卓越振動数(図-4)と解析による固有振動数(表-1)を対比すると、以下のことがわかる。

- ・ 卓越1次振動数(4.3Hz)は、曲げ1次固有振動数(3.33~3.45Hz)の1.2倍程度以上となる。
- ・ 卓越4次振動数(31.5~32.0Hz)は曲げ3次の固有振動数(30.00~31.02Hz)に近い。

3. 2 固有振動数に及ぼす構造条件の影響

3. 1節にて振動計測より確認された卓越振動数と一般的な算定手法より求めた固有振動数の一部に相違があった。そこで、本節では構造条件を変化させた場合の固有振動数に及ぼす影響を詳細に検討する。構造条件は、以下の2点を考慮する。

- ・ 主桁中立軸と支承回転中心までの距離(h) : これを考慮すると、例えば支承条件がピン(橋軸方向の移動を拘束)の場合においても、支承上の桁の回転角(θ)に応じて主桁中立軸における移動量(L)はゼロ(=拘束)とならない(図-6参照)。
- ・ 支承条件: 本橋には線支承¹⁾が用いられ、腐食により支承機能が変化していると考えられる(写真-2)。そこで、支承条件をピンローラーの“FM”のほかに、両支点とも橋軸方向の移動を拘束したピンピンの“FF”，あるいは、橋軸方向の回転拘束を含め全自由度を拘束した“RR”について検討する。

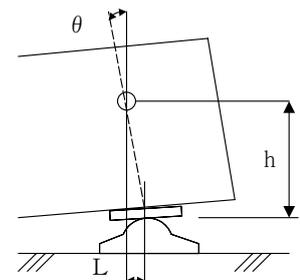


図-6 支点部の移動量



写真-2 支承の状況

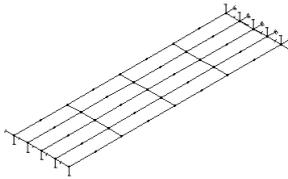
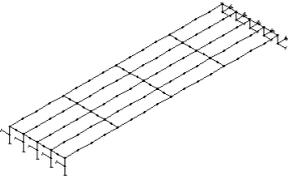
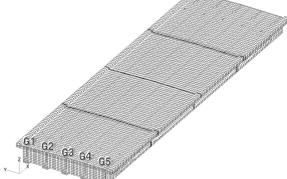
表-2は、構造条件を変化させた場合の固有振動数を各解析モデルを用いて求めたものである。ここで、構造条件1を考慮するため、ケース7として各主桁の両支点部に鉛直部材を追加した立体骨組み、ケース8として対象PC橋をソリッド要素で復元した立体FEMにてモデル化した。また、表-2中のケース6(FM)は実弾性係数33.7kN/mm²を用いる以外は前出表-1に示したケース6と同一モデルで

表-1 一般的な算定手法による固有値解析結果

項目	記号	単位	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
算定方法			理論式	FEM解析(集中質点法)				
質点数(橋軸方向)			---	9	17	9	17	
モデル			一本梁			平面骨組み		
横桁の取り扱い			全て無視			自重無視	全て考慮	
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					
単位重量	w	N/m ³	24500					
重力加速度	g	m/s ²	9.80665					
スパン	L	m	27.3					
固有振動数(曲げ)	f ₁	1/s(Hz)	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.33
			---	(0.0%)	(0.0%)	(0.0%)	(0.0%)	(3.4%)
	f ₂		13.79	13.78	13.78	13.09	13.78	13.33
			---	(0.1%)	(0.1%)	(5.1%)	(0.1%)	(3.3%)
	f ₃		31.02	30.97	31.01	現れず	31.01	30.00
			---	(0.2%)	(0.0%)		(0.0%)	(3.3%)
固有振動数(ねじり1次)			---	---	---	4.24	4.24	4.14

注) 諸定数は主桁のみ表記した。固有振動数の括弧内の数値はケース1と対比した際の低減率を示す。

表-2 固有振動数に及ぼす構造条件の影響

算定ケース	ケース6：平面骨組み			ケース7：立体骨組み			ケース8：立体FEM		
解析モデル (使用要素)	 (ビーム要素)			 (ビーム要素)			 (ソリッド要素)		
構造条件1：主桁中立軸と 支承回転中心までの距離	未考慮			考慮			考慮		
構造条件2：支承条件	FM	FF	RR	FM	FF	RR	FM	FF	
固有値解析 結果	曲げ1次	3.27	3.27	7.41	3.23	4.90	4.98	3.51	5.11
	曲げ2次	13.08	13.08	20.40	12.17	12.41	14.50	12.60	12.86
	曲げ3次	29.43	29.43	39.48	31.26	31.33	31.58	29.50	29.44
	ねじり1次	4.06	4.06	7.68	4.21	5.43	5.47	5.28	5.70

注) 弾性係数は主桁コンクリート 33.7kN/mm² (コア試験結果より), アスファルト舗装 3.0kN/mm² (ケース7のみ) とした。

ある。この表より、構造条件の違いにより、固有値解析結果が大きく異なることがわかる。このうち、ケース7の立体骨組みの曲げ固有振動数は、構造条件2のFM・FFともケース8の立体FEMのそれに概ね一致した。一方、ねじり1次固有振動数はケース6・7の両ケースとも、ケース8の立体FEMの結果を精度良く再現することができなかつた。これは、床版や横桁等の橋軸直角方向部材を十分にモデル化できていないためと考える。

a) ケース6：平面骨組み b) ケース7：立体骨組み

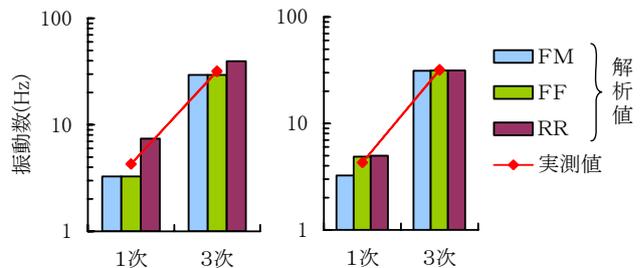


図-7 計測結果と解析結果との比較

図-7は、振動モードを確認できた曲げ1次と曲げ3次を対象とし、前出の計測結果(図-4)と解析結果(表-2)を比較したものである。これより、実測された卓越振動数はケース7の立体骨組みのFFあるいはRRに近づくものと判断される。

4. まとめ

PCT桁橋の振動解析手法に関する検討を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) 一般的な算定手法を用いた固有値解析結果によれば、曲げ1次の固有振動数は各算定手法とも概ね一致したが、平面骨組みモデルの曲げ2・3次固有振動数に差異が現れた。これは、質点の取り方の影響と考えられ、PCT桁橋の固有値解析を平面骨組みでモデル化する場合には注意を要する。
- (2) 実測の卓越振動数と解析による固有振動数とを比較した結果によると、本橋に用いられている支承は設計上のピンローラー(FM)でなく、ピンピン(FF)や完全固定(RR)に近づいた。また、単純支持の状態でないPCT桁橋を対象として固有値解析を行う際には、主桁中立軸と支承回転中心までの距離を考慮する必要があることが解析的に確認された。

【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) 日本道路協会：道路橋支承便覧，pp. 49，2004. 4