

減衰の大きな橋脚の時定数に着目した固有周波数判定法について

正会員 JR東日本 ○本廣 竜三

正会員 JR東日本 長谷川 祐二

シンクロ(株)上石 陽一

はじめに

従来橋脚の健全度判定には、30kg 程度の重錘による衝撃振動試験方法（以下「重錘法」と言う）が用いられてきた。この方法は橋脚の狭隘部で行うため、櫓や足場を組むなどの準備・撤去作業を余儀なくされてきた。またFFT処理による固有周波数から健全度を評価しているが、データ不良など固有周波数の判定を困難とするケースが発生した。このため軽量ハンマーによる衝撃振動試験方法（以下「軽量法」と言う）を進め、データ不良のうち減衰の大きな橋脚の時定数に着目し、FFT処理を補完する判定方法を考案したので報告する。

1. 橋脚モデリング

(1) 減衰時間と橋脚の1自由度共振モデル

重錘法により固有周波数が20Hzである橋脚を軽量法で計測したデータを図1に示す。FFT処理では20Hz程度の固有周波数を分析するため、約1.5秒のデータ長が必要である。しかし減衰の大きな橋脚では加振による振動の持続時間が短い。特に軽量法で数十ミリ秒、重錘法でも1秒以下では固有周波数を明瞭にできないケースが多い。このような短時間でかつ減衰の大きな波形に対しては、波長の長い固有周波数を抽出せずに、高周波成分の減衰形状に着目し固有周波数を推定する。まず1自由度の共振モデルを橋脚モデルと仮定する(図2)。減衰は粘性抵抗Cと損失係数 η により変化する。それらの係数の影響は固有周波数に対しても、高周波成分の減衰に関しても等しい。いま十分な加振力を用いた場合の固有周波数 f_0 は、

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi \cdots \cdots (1)$$

であり、これに次式を代入して

$$\omega_0 = \eta \cdot K / C \cdots \cdots (2)$$

$$f_0 = \eta \cdot (K / 2\pi C) \cdots \cdots (3)$$

となる。なおKはバネ定数、Cが粘性抵抗、 η が損失係数である。

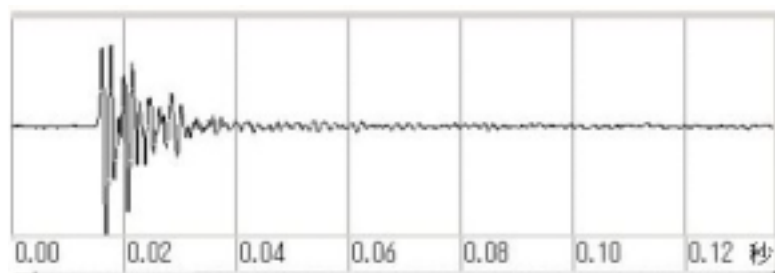
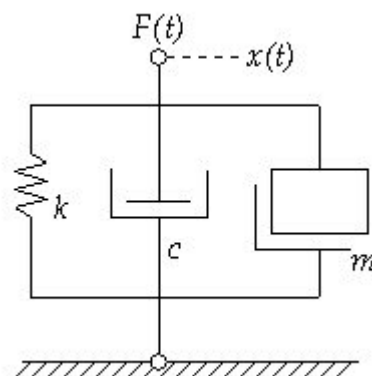


図1 軽量法での計測データ

図2 1自由度の共振モデル
(m:質量、C:粘性抵抗、k:ばね)

(2) n次の高次振動モデル

図1のような低周波振動成分が少なく減衰時間が短時間で、高い共振周波数成分 f_n を有する波形において、 f_n を橋梁の固有周波数 f_0 のn次共振周波数であると考えた。その減衰振動の過渡応答は

$$x(t) = x_0 \exp(-\eta \omega_n t / 2) \cdot \sin[\sqrt{1 - (\eta^2 / 4)} \cdot \omega_n t] \cdots \cdots (4)$$

この振動のピークをなぞる包絡線カーブは

キーワード：固有周波数、時定数、FFT、衝撃振動試験

連絡先：〒331-9555 埼玉県大宮市錦町434番4 JR東日本大宮支社設備部設備土木課 TEL048-642-7406

$$\times_0 \exp(-\eta \omega_n t / 2) \cdots \cdots (5)$$

で表現でき、その時定数 T_N から固有の周波数を求めることができる。時定数 T_N は (5) 式より

$$-1 / T_N = -\eta \omega_n / 2 \cdots \cdots (6)$$

である。周波数 f_N は

$$f_N = \eta (\omega_n / 2) \cdots \cdots (7)$$

が導かれ式 (3) と同じく定数 η に係る式となる。今、仮に両式 (3) (7) の間に

$$f_N / f_0 = K_{N0} \cdots \cdots (8)$$

なる比例関係があると仮定すれば、打音検査により f_N の減衰形状を知れば、 K_{N0} との関係として固有周波数 f_0 を推定できることになる。

2. 時定数と固有周波数の推定

計測データを絶対値化し、絶対値化データに対して近似化を行い減衰曲線を得る。近似式は

$$g(t) = K / T * e^{(-t/T)} \cdots \cdots (9)$$

を用いて対数曲線による近似を行う。近似された対数曲線を減衰曲線として、時定数 T は減衰曲線の減衰値数点での時間を計測し、平均値を取って時定数 T の値とする。 $f = 1 / (2\pi T)$ により固有周波数 (推定値) を決定する。

3. 測定結果

センサには小型軽量の加速度センサを用い高調波を捕らえやすくした。計測データの高調波減衰曲線より対数近似により固有周波数を推定し、重錘法測定結果と比較した。図より T および 2 倍の T を読み、平均した推定固有周波数 f を算出し、表 1 の結果を得る。表 1 は重錘法と今回推定した固有周波数であり、両者は良く一致している。この結果より 1 項で仮定した f_N の減衰形状と固有周波数との間に比例関係がある可能性が高くなった。図 3 は今まで FFT では測れなかった橋台の減衰曲線と対数近似曲線である。この図より T および 2 倍の T を読み取り算出した結果、推定した固有周波数 f は 20.5Hz となった。

橋脚 No.	重錘法	軽量法 (FFT によらない)
1P	19.7Hz	20.2Hz
3P	14.5Hz	14.4Hz

表 1 重錘法と推定固有周波数の比較

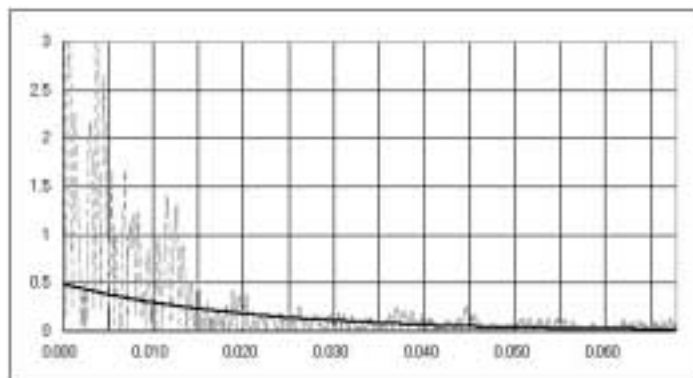


図 3 橋台の減衰曲線

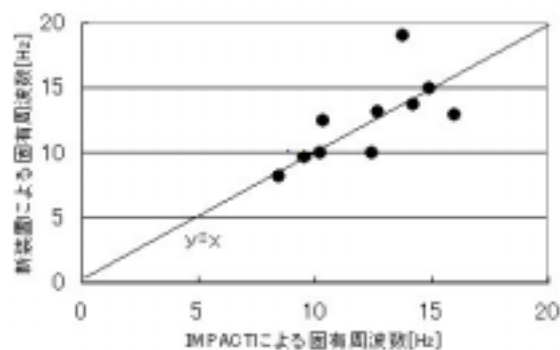


図 4 重錘法と軽量法による固有周波数の比較

4. 考察

当初 FFT の代替としてウェーブレット解析を検討したが、データ長を数百ミリ秒以上必要とし、上記のような波形の解析は困難であった。図 4 は重錘法と軽量法による固有周波数の比較である。解析可能なデータについてはほぼ一致しており、橋脚の健全度を診断し判定する支障とはならない。表 1 は FFT で困難な軽量法データに本判定方法を適用したものである。以上のように減衰曲線による固有周波数推定は、FFT で推定できないケースについて補完できる可能性が高いと考える。一般に線形構造物の橋脚などの根入れ深さと固有周波数の相関が知られており、橋脚の根入調査の大幅な作業改善が可能である。今後は橋梁など大型施設を対象にデータ蓄積増加を行う。また、軽量加振装置の打撃によって十分な精度で固有周波数を推定できれば、打撃器具を改良するなど、その他の基礎構造物への適用範囲の拡大も考えられる。