

# (163) 橋梁基礎の健全度判定法と判定例

(財) 鉄道総合技術研究所 西村昭彦  
同 上 羽矢 洋

## はじめに

基礎構造物は一般に地中に設置されるため、その健全性を直接目で見て確かめることは難しい。そこで既設橋梁の基礎の健全度判定のための指標として固有振動数を用いることとし、その値を簡易にしかも精度良く測定するための試験法として衝撃振動試験を開発した。その詳細については既に紹介した<sup>1)</sup>が、その後、本試験法の改良を行うとともに、健全度判定のための固有振動数の標準値（その橋脚が健全な状態にある場合の標準的な固有振動数で、橋脚高さ、桁重量等を変数とする算定式によって算出される。）の精度の向上を図った。なお、この標準値はこれまで橋脚についてのみ紹介していたが、今回、ラーメン高架橋の標準値を算出する式も検討したので併せて紹介する。

また、本試験を実施し、変状のある橋梁を発見した例を紹介する。

## 1. 橋梁基礎の健全度判定方法

橋梁基礎の固有振動数を用いた健全度判定方法のフローチャートを図1に示す。これは現場で行った衝撃振動試験によって得られた橋脚の固有振動数と4. で示す算定式によって算出される標準値を比較し、表1に示す健全度判定基準にあてはめて対象橋脚の健全度を判定するか、あるいは以前に衝撃振動試験を行った経歴があり、その時の固有振動数が把握されている場合は今回と前回の値を比較し、前回の結果に対する状態の変化の程度から対象橋脚の健全度の判定を行うものである。そして、判定ランクがA1となった場合、固有値解析を実施し、衝撃振動試験によって得られる固有振動数と振動モードに解析値が一致するようシミュレーションを行い、躯体の剛性、および地盤ばねの評価を行う。それと同時に傾斜、沈下に関する計測データや土質柱状図も参照して、効果的な補修、補強対策の立案を行う。

この判定法の中で用いられる指標は次の3項目である。

- ① 衝撃振動試験によって求まる固有振動数
- ② 固有振動数の標準値
- ③ 健全度指標

以下に各指標について簡単に述べる。

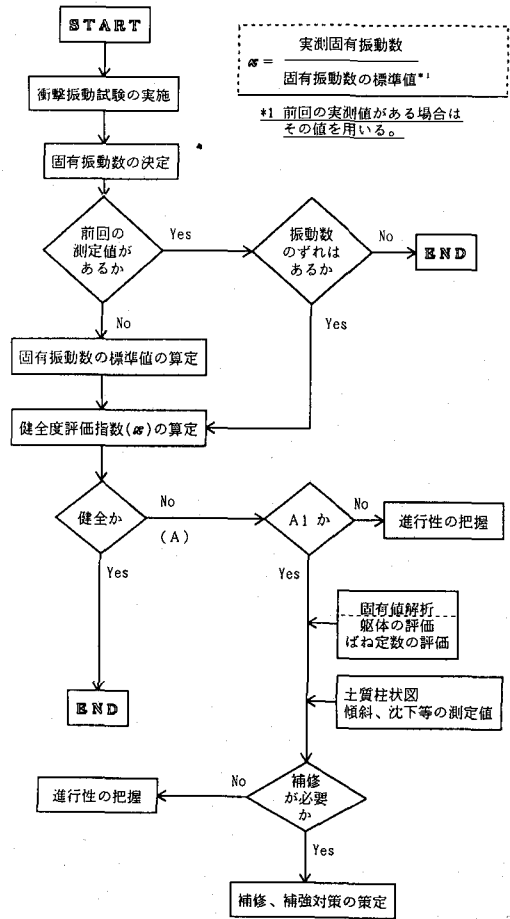


図1 橋梁の健全度判定の手順

## 2. 衝撃振動試験により求まる固有振動数

対象とする構造物の固有振動数を求める方法については、任意の振動数で加振できる起振機を橋脚天端に設置して強制振動試験を行う方法、常時微動を用いて行う方法等があるが、本研究では重錘や掛矢で構造物を打撃し、その応答波形のフーリエスペクトルから固有振動数を求める衝撃振動試験を採用した。参考文献<sup>1)</sup>にも述べたが図2に示すように過去に起振機による強制振動試験が実施され、固有振動数の判明している橋梁で衝撃振動試験を行い結果の比較を行ったところ両者の共振曲線の形状はよく一致しており、衝撃振動試験における卓越振動数は固有振動数に一致すると考えてよいことがわかる。また、衝撃は強制振動であるので固有振動数の判定に位相差も併せて利用できることがこの試験の特徴である。

## 3. 固有振動数の標準値

対象とする構造物が健全な状態にある場合の標準的な固有振動数(標準値)を算定する式については既に一部を紹介しているが<sup>1)</sup>、それ以降も(財)鉄道総合技術研究所で収集してきたデータを追加し、より精度の高い式を得ることができた。表2に示す橋脚の標準値算定式は既に紹介済みの算定式であるが、これは石積み、煉瓦積み、あるいはコンクリート造の単線橋脚を対象とした式であり、橋桁重量、土被りを差し引いた橋脚高さ等を変数とする算定式となっている。表中、解析地盤定数とあるのは直接基礎の支持地盤の強さを表す指標で標準貫入試験結果があればN値に4を掛けた値を、N値は不明であるが支持地盤の状態がわかっている場合は表3の値を利用する。一方、表4に示す標準値算定式は在来線、新幹線における複線橋脚を対象とした式で、変数として橋軸直角方向の橋脚幅等を追加したものである。なお、各算定式の相関係数は表2の式で0.70以上、表4の直接基礎に関する算定式で0.88、杭基礎に関する算定式で0.73、ケーソン基礎に関する算定式で0.77と各々相関の高い式となっている。参考までに多変量解析に用いたデータ数は単線橋脚で約500基、複線橋脚で約180基である。なお、この解析に用いた橋脚には目立った変状は無く、概ね健全であることから、ここに示した固有振動数算出式から求まる値は橋脚の固有振動数の標準値、すなわち健全な状態での固有振動数と考えてよい。

表1 基礎構造物の健全度判定基準

健全度指標	判定ランク	処 置
0.70以下	A	(A1) 異常時外力に対して危険な変状がある。他の調査結果を参照し、補修、補強を考慮する。
0.85以下		(A2) 固有振動数の低下など進行性の把握を行う。
0.86以上	B 以上	現状では問題は少ない。

$$\text{健全度指標}(\kappa) = \frac{\text{実測固有振動数}}{\text{固有振動数の標準値}}$$

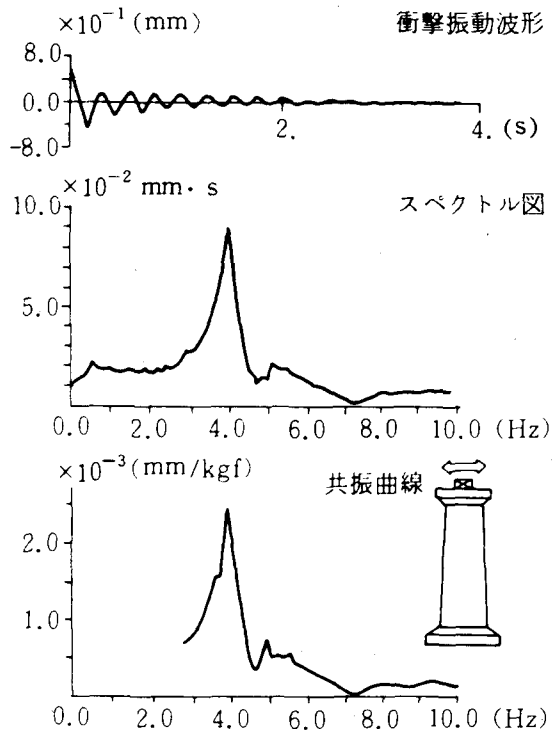


図2 起振機試験との比較

#### 4. 健全度指標

衝撃振動試験の結果求まる実測固有振動数と、算定式より求まる標準値を用いて健全度指標 ( $\kappa$ ) を算出、その値から基礎構造物の健全度判定を行う。表1に健全度指標の値と処置の仕方を示す。なお、 $\kappa$ の数値は実際にこれまでの災害で変状を生じたり、あるいは洗掘が進行し、危険な状態となった橋脚の実測例から決定した。

表3 解析地盤定数適用の考え方

地盤の状態	解析地盤定数
岩盤ないし洪積砂れき層	300以上
普通の砂層および硬質な粘性土層	100~300
軟弱な沖積層	100以下

#### 5. 橋脚の変状を発見した例

基礎の変状の代表的なものは洗掘が進行し、地盤による拘束力が減少することである。こうなると橋脚の固有振動数は小さくなり、その橋脚を補強することで逆に固有振動数は大きくなるはずである。

以下にその一例を示す。

この橋脚は昭和3年に築造された無筋コンクリート製丸型断面単線橋脚で常時流水部に位置する。この橋脚に対し衝撃振動試験を実施したところ固有振動数が

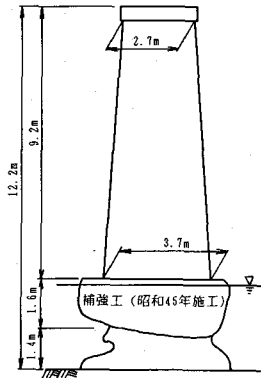


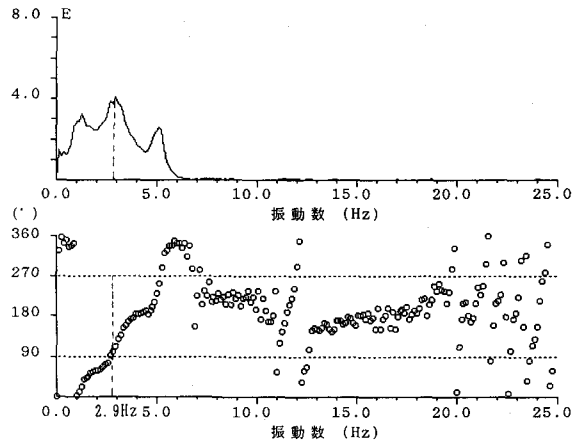
図3 異常発見時の橋脚の変状状態とスペクトル図

表2 橋脚の固有振動数の標準値 (橋軸直角方向)

基礎形式	地盤区分等	固有振動数の標準値 (F) を求める式
直接基礎	解析地盤定数	Hd: 橋脚高さ-土被り (m) Wh: 桁重量 (tf)
	100以下	$F = 25.4 Hd^{-0.47} Wh^{-0.11}$
	101~300 300以上	$F = 49.0 Hd^{-0.47} Wh^{-0.24}$ $F = 83.7 Hd^{-0.71} Wh^{-0.20}$
杭基礎	木杭	$F = -9.9 \log Hd + 0.005 Wh + 14.9$

表4 複線橋脚の固有振動数の標準値 (橋軸直角方向)

基礎形式	固有振動数の標準値 (F) を求める式 (Hz)
直接基礎 (複線橋脚)	$F = 23.73 \times \frac{B^{0.814}}{Wh^{0.288} \times Hd^{0.752}}$ Wh: 桁重 (tf) Hd: 橋脚高さ-土被り (m)
杭基礎 (RC, PC, 場所打ち杭)	$F = 35.0 \times \frac{(B^3/L)^{0.15} \times (D^3 \times N^{1/4} \times n)^{0.1}}{(Wh \times t^2)^{0.25}}$ B: 橋軸直角方向の幅 (m) L: 橋脚高さ (m) D: 杭径 (m) n: 杭本数 (本) N: 加重平均N値, 下式で求める $N = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i / L_i)}{\sum_{i=1}^n (1 / L_i)} \cdot l_i$ $l_i$ : i層目の層厚 (m) $L_i$ : i層目の深さ (m) $N_i$ : i層目のN値
ケーソン基礎	$F = 11.83 \times \frac{N^{0.184}}{Wh^{0.288} \times Hk^{0.059}}$ Hk: 橋脚の高さ-天端の張出部の高さ (m)



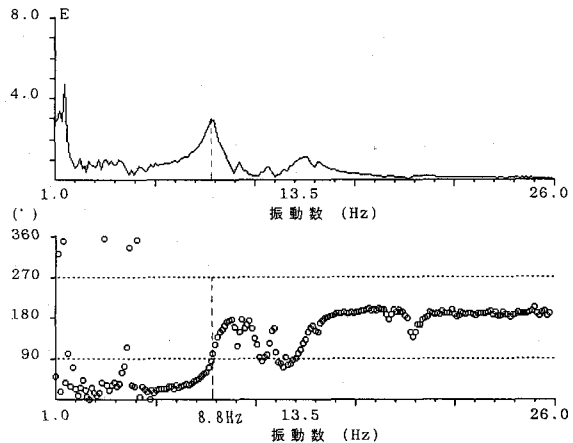
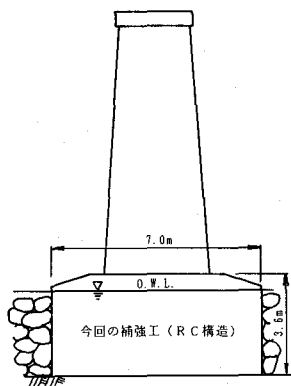


図4 橋脚補強工概要と補強後のスペクトル図

2.9Hzと非常に小さい値を示した(図3)。なお、ここでいう固有振動数は衝撃振動試験を橋軸直角方向に行ったときの橋軸直角方向の値である。この場合の健全度指標を求めたところ、その値は0.40で、判定ランクはA1となる。そこで、水を閉め切り、周面をドライにして目視確認したところ、図3に示すようにフーチングまで完全に露出した状態であった。なお、本橋脚は昭和45年にも根巻きコンクリートによる補強が施工されている。施工時は補強工の周りは敷石によって防護されていたが、今回の調査ではその補強工の下部まで完全に洗掘を受け、補強工下面、および橋脚断面の一部が欠損している箇所も見つかった。そこで、直ちに徐行措置を採るとともに図4に示すように鉄筋コンクリートを外巻きするとともに、周囲を玉石等で埋め戻した。施工後に行った衝撃振動試験結果を図4に示す。この結果から橋脚の固有振動数は8.8Hzにまで増加し、健全度指標は1.14で判定ランクはB以上となり、健全な状態となったことがわかる。

表5 ラーメン高架橋の固有振動数の標準値(橋軸直角方向)

## 6. ラーメン高架橋への適用

ラーメン高架橋にも衝撃振動試験を実施し多くのデータを得た。このデータを基に多変量解析を行い、得られた固有振動数の標準値算定式を表5に示す。算定式の相関係数は直接基礎に関しては0.93、杭基礎に関しては0.69となっている。なお、解析に用いたデータ数は約60基である。これにより、ラーメン高架橋も図1の判定フローチャートを用いて健全度を判定できる。

基礎形式	固有振動数の標準値(F)を求める式(Hz)
直接基礎	$F = 4.03 \times \frac{N^{0.14}}{Hd^{0.37}}$ N:加重平均N値 Hd:橋脚高さ-土被り(m)
杭基礎	$F = 5.12 \times \frac{(D^3 \times N^{1/4} \times n)^{0.01}}{Hd^{0.34}}$ D:杭径(m) n:杭本数(本)

## おわりに

この衝撃振動試験は、JR各社の構造物検査担当者によって実施され、実績が積み重ねられるとともに、試験法に関して出される多くの意見を取り入れることによって改善されてきている。なお、ここに示した構造物の固有振動数の標準値算出式は、これまでにJR各社の協力によって収集したデータによって作成したものであることを申し添え、関係された方々にお礼申し上げます。

## [参考文献]

- 1) 西村昭彦: 衝撃振動試験による基礎構造物の健全度診断、第8回日本地震工学シンポジウム、1990