

(121) 衝撃振動試験による構造物の振動特性の把握

(財) 鉄道総合技術研究所 正員 ○西村昭彦
(株) 福山コンサルタント 中野 聡

1. はじめに

現在鉄道橋の下部工の健全度は、傾斜や沈下など静的な変形量とともに、列車走行時の橋梁の動的な振動振幅を測定し、それらの値から判定している。この列車走行による方法は通常では直接見ることの出来ない基礎構造物を調査するには優れた方法である。この方法は列車による振動を、単位沈下量(列車走行時の橋脚の最大沈下量を列車荷重で除した値)および水平方向の卓越振動数、振動振幅で整理し、この値に経時変化があった場合ないしは基準値から外れた場合は基礎に問題があるとするものである。しかしこれらの値は列車の種別および速度などによって変化するはずであるが、現行の方法ではこれを考慮していないため、測定値のバラツキが大きくなり、健全度判定の指標としては不十分である。

既設の鉄道下部工の健全度や耐震性を判定する場合、その指標とすべき値のうち主なものは、固有振動数またはそのもととなる地盤反力係数や橋脚躯体の曲げ剛性であろう。この値を求める場合、一般に行われるのが常時微動の測定や起振機等による強制振動試験である。しかし強制振動試験は時間や費用が多くかかり数多くの橋脚に適用するには実用的でないし、常時微動は構造物などの条件が良くないと精度のよい結果が得られない。そこで簡単でしかも精度のよい数値を得るため、重錘の衝撃による振動試験を試みた。この試験は軽い重錘を橋脚に当て、その応答波形を重ね合わせて大きな応答振幅とし、それを周波数分析して、固有振動数を得るものである。そしてこの試験で得られる固有振動数が構造物の状態の変化に応じて変化するか、また強制振動試験で得られた固有振動数と一致するかどうか検討した。以下にその検討結果について述べる。

2. 測定手法の概要

この試験は図-1に示すように橋脚の天端下約1mの箇所に重錘により橋軸方向および橋軸直角方向に衝撃力を与え、その衝撃力および橋脚の応答を測定するものである。重錘は作業性を考慮して、30～50kgfの比較的軽量の物とし、測定した波形をパソコンで数回～数十回重ね合わせることでより大きな振幅の応答値を得ることとした。この応答値のフーリエスペクトルを荷重のフーリエスペクトルで除したものが衝撃による橋脚の周波数応答関数であり、この関数の振幅の卓越する振動数が橋脚の固有振動数となる。

この固有振動数は基礎底面の鉛直地盤反力係数と躯体の曲げ剛性から求めることが出来るが、逆に固有振動数が分かれば、それらを決定することも出来る。そこで次の解析を行いその値を決定する。まず桁の拘束のない橋軸直角方向の固有値解析で鉛直地盤反力係数を決定し、その値を用いて橋軸方向のモデルを作成する。橋軸方向の解析では桁の拘束による効果および躯体の曲げ剛性を変化させながら実験で得られた固有振動数と振動モードを説明できる値を決定する。こうして得られた鉛直地盤反力係数と躯体の曲げ剛性を整理しておき、次の測定値と比較して橋梁の健全度を判定する。

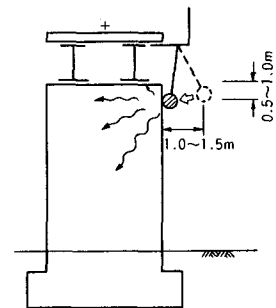


図-1 衝撃振動試験

3. 衝撃振動試験

3.1 実験対象橋梁

衝撃振動試験を、基礎形式、構造寸法などが異なる4橋梁において実施したが、そのうち東海道本線函南、三島間神川橋梁については、耐震補強工の施工時期と合わせて実施した。耐震補強工は躯体の補強のみならずフーチングの拡幅も伴ったため、周囲の土を掘削したが、あたかもこれが洗掘の進行に相当し、この手法によりその状態を把握することが出来るかどうかの検討が出来た。ここでは神川橋梁の補強工の施工前と施工中（フーチングが露出した状態）および施工後（フーチングが拡幅された状態）の試験結果について示すことにする。

図-2に神川橋梁および試験対象橋脚の概要を、図-3に土質柱状図を示す。この橋梁は橋脚に単線のスパン16mのデッキガーダーが並列に並んでいる。また地盤は沖積砂礫層である。

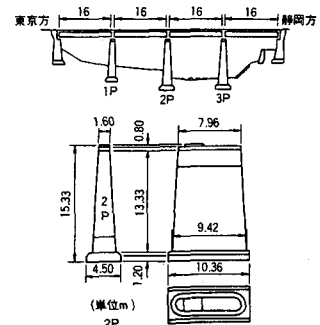


図-2 神川橋梁の概要

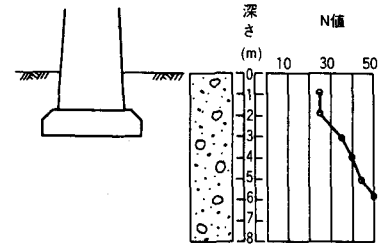


図-3 土質柱状図

3.2 実験結果

衝撃荷重がホワイトノイズのように周波数領域において一定値を持てば、理論的にはこの試験で得られる卓越周期は固有周期に一致するはずである。そこで荷重のフーリエスペクトルを求めた。それを図-4に示す。このスペクトルは20Hz程度までは平坦性が認められるので、以下の試験においては構造物の固有周期は構造物のスペクトルだけで判断した。また、衝撃試験では橋脚の応答変位を測定した。図-5に橋軸直角方向の、図-6に橋軸方向の応答波形およびそのフーリエスペクトルを示す。これらはいずれも補強前の10回の測定値を重ね合わせた波形である。図-5のスペクトルでは3個の卓越振動数が読み取れるが、一番高い振動数（8Hz）は上部工（桁）の固有振動数であり、5.5Hzが橋脚の固有振動数である。なお1Hz付近の振動数は測定ないし重ね合わせによる誤差と考えられる。

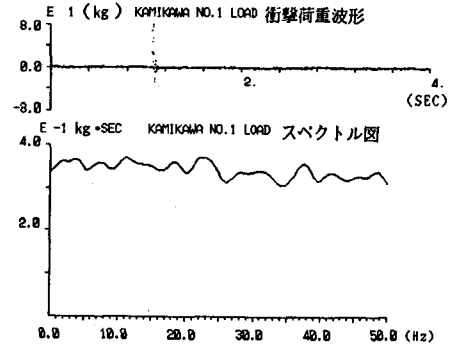


図-4 衝撃荷重の周波数特性

次に耐震補強工の施工前、施工中と施工後の橋軸方向、橋軸直角方向の固有振動数を表-1に示す。

表-1 神川橋梁の固有振動数

耐震補強工	橋軸直角方向 (Hz)	橋軸方向 (Hz)
施工前	5.5	6.5
施工中	5.0	6.0
施工後	5.5	6.1

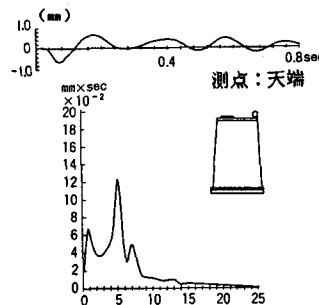


図-5 変位波形の重ね合わせ
及びスペクトル図
(神川橋梁補強中、橋軸直角方向)

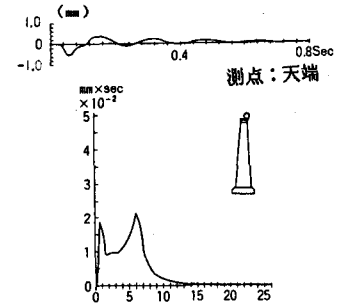


図-6 変位波形の重ね合わせ
及びスペクトル図
(神川橋梁補強中、橋軸方向)

橋脚躯体は施工前、施工中で変化がないことからこの差異はフーチングの側面の掘削の影響と考えられる。これはまた、洗掘などフーチングの周囲の地盤の変化が、この手法によって把握出来ることも示している。

なお、施工後の試験はフーチングの埋戻しを行っていない状態で行ったが、得られた固有振動数にはフーチング拡幅の影響が現れている。

4. 衝撃振動試験と強制振動試験の比較

4.1 対象橋梁

上述したように衝撃振動試験の応答を周波数分析することにより、構造物の卓越周期が得られることが分かった。先に述べたようにこの卓越周期は理論的には固有周期と一致するはずである。しかし起振力の違いなどによって異なることも考えられるので、このことを確かめるために、強制振動試験の行われた橋脚において衝撃振動試験を実施し、その比較を行った。対象とした橋梁は次の3橋梁である。

- ①川越線 荒川橋梁 2P
- ②奥羽線 第2松川橋梁 2P, 3P, 4P
- ③芸備線 第1小島原橋梁 2P, 3P

これらの橋梁の概略を図-7, 8, 9に示す。地盤は荒川橋梁は軟弱な粘性土で5mの杭が打設してあるが他は風化岩であり良好な支持層である。

4.2 試験結果

図-10~12に各橋梁の衝撃振動試験の波形およびそのフーリエスペクトルと強制振動試験の共振曲線を示す。なお共振曲線はスペクトルと比較するため、単位起振力当りの振幅にして表示した。これらの図では奥羽線第2松川橋梁の場合で、0.1Hz ~ 0.2Hz 程度衝撃振動試験の方が振動数は高いもののスペクトルと共振曲線はよい一致を示しており、衝撃振動試験で得られる卓越周期は固有周期と考えてよいと思われる。また第1小島原橋梁の結果から判るように、スペクトル図は共振曲線と良く似た特性を持っている。この2ないし3のピークは隣接する橋脚の固有振動によるものであり、衝撃振動試験は良くこれをとらえていると言うことが出来る。

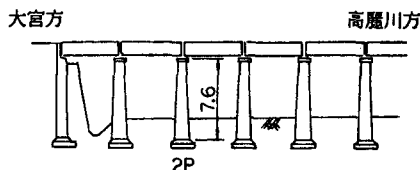


図-7 川越線荒川橋梁概略図

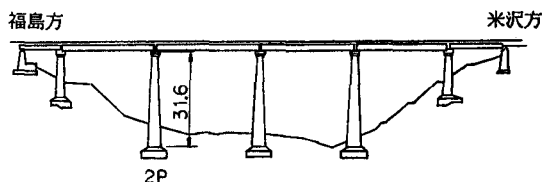


図-8 奥羽線第2松川橋梁概略図

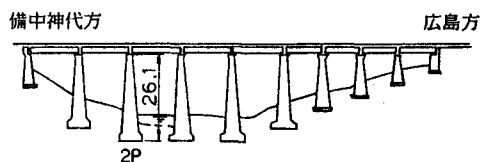


図-9 芸備線第1小島原橋梁概略図

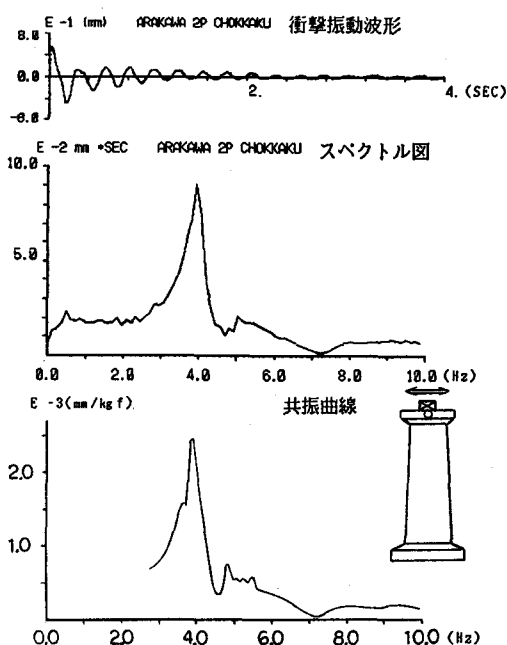
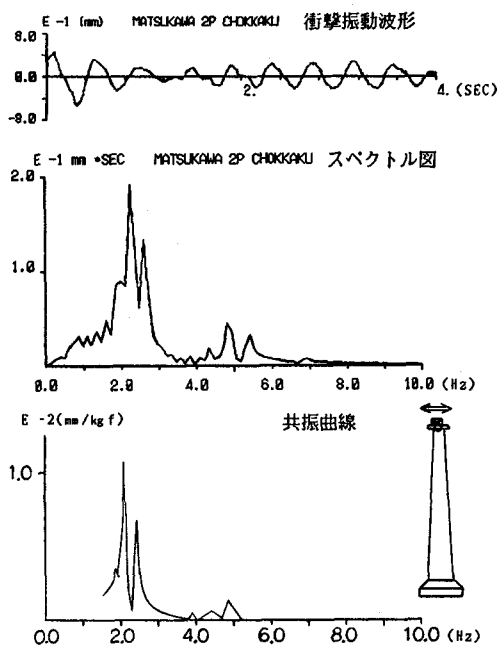
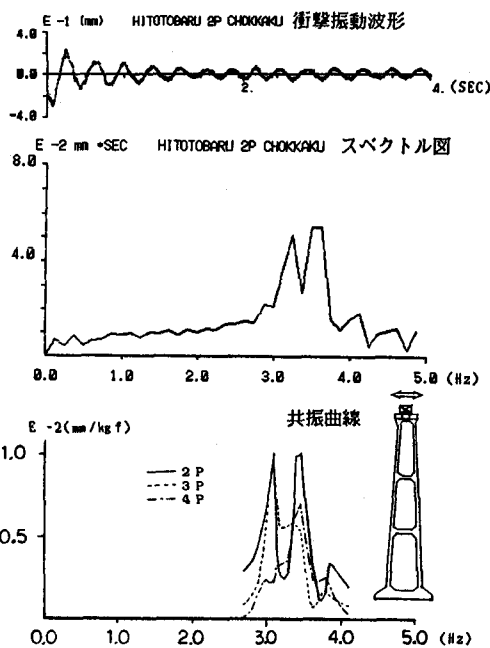


図-10 衝撃波形のスペクトルと共振曲線の比較
(川越線 荒川橋梁 2P)



図一 1 1 衝撃波形のスペクトルと共振曲線の比較
(奥羽線 第2松川橋梁2P)



図一 1 2 衝撃波形のスペクトルと共振曲線の比較
(芸備線 第1小島原橋梁2P)

比較を行った橋梁の衝撃振動試験と、強制振動試験より得た固有振動数をまとめて表一2に示す。先に述べたように両者には振幅の差と考えられる0.1Hz～0.2Hz程度のずれが見受けられるが、その特性は非常に良く一致している。

5. おわりに

比較的簡単に行える衝撃振動試験で橋脚の固有周期が把握できることが判明したので、今後はこれを橋脚の健全度の判定の一つの指標とするつもりである。なお、この試験を実施するに当たってご協力を頂いた、国鉄（現JR旅客鉄道会社）の各構造物検査センターの皆様には厚く御礼申し上げます。

「参考文献」

- 1) 西村、真田、丸山：「衝撃および列車走行試験による橋梁の振動特性の把握」、第7回日本地震工学シンポジウム、1986年12月
- 2) 西村昭彦：「新しい振動沈下試験」、鉄道土木28巻11号、1986年11月

表一2 橋脚の固有振動数比較一覧

橋 梁 名	振 動 実 験				衝撃試験（桁有り）	
	橋 軸 方 向		橋 軸 直 角 方 向		橋 軸 方 向	橋 軸 直 角 方 向
	桁有り	桁無し	桁有り	桁無し		
川越線 荒川橋梁 2P	(Hz) 5.4, 9.0	—	(Hz) 3.9	—	(Hz) 5.4, 9.0	(Hz) 3.9
奥羽線 第2松川橋梁 2P	—	2.9	2.1, 2.4	2.9	5.0, 6.0	2.3, 2.6
奥羽線 第2松川橋梁 3P	—	2.9	1.8, 2.4	2.8	5.0, 6.0	2.0, 2.6
奥羽線 第2松川橋梁 4P	—	2.8	1.9, 2.1 2.5	2.8	5.0, 6.0	2.0, 2.2, 2.6
芸備線 第1小島原橋梁 2P	—	4.6	3.1, 3.5	4.6	5.0, 10.5	3.2, 3.6
芸備線 第1小島原橋梁 3P	—	4.1	3.1	4.1	5.2, 10.2	3.2