

報告 衝撃振動試験による構造物の健全性評価に関する一考察

中川 元宏^{*1}・庄 健介^{*2}・上野 勝大^{*3}・佐藤 亮^{*4}

要旨：固有振動数を用いて既設構造物の健全性を評価する方法については、多くの研究が行われている。供用中の構造物における固有振動数の変化は、主に部材の曲げ剛性および地盤のバネ定数の変化が原因となって生じる。本文では、実際に供用されていた鉄道構造物（コンクリート橋脚）に疑似損傷を与え、鉄道分野で広く用いられている固有振動数の測定方法である衝撃振動試験を実施し、部材の部分的な損傷が固有振動数に与える影響について、把握を試みた結果を報告する。

キーワード：躯体健全性評価、衝撃振動試験、固有振動数、固有値解析、非破壊調査

1. はじめに

鉄道構造物や道路構造物等のライフライン構造物がその機能を停止した場合には、社会活動に重大な影響を与える。特に、先の阪神・淡路大震災でも明らかとなったように、災害時における早期の機能回復はきわめて重要である。さらに、最近、部材の経年劣化による損傷が社会問題となっており、今後さらに増加することが想定されるが、コンクリート構造物については、材料劣化による部分的損傷の評価および劣化予測と併せて、散在する部分的損傷が構造系全体に与える影響を適切に評価し、補修並びに補強の検討を行う必要がある。

これらの問題を背景として、種々の健全度評価手法が検討されているが、鉄道分野においては、構造系全体の健全性を非破壊で簡易的に評価できる検査手法として、衝撃振動試験が主に広く利用されている。

衝撃振動試験は、西村ら¹⁾が開発した試験方法で、固有振動数を指標として構造物の健全度を評価する方法である。

構造物の固有振動数は、死荷重、上載荷重、部材の曲げ剛性、地盤のばね定数により決定さ

れる。構造物の死荷重、上載荷重が供用期間中ほとんど変化しないことを考慮すると、部材の曲げ剛性および地盤のバネ定数の変化が、固有振動数の変化となって表れるものと考えられる。実際に、河川内橋脚の洗掘による地盤バネの変化を衝撃振動試験により把握した事例は多数報告されている²⁾。

本報告では、部材の部分的な損傷による構造系全体への影響を把握することを目的として、実際に供用されているコンクリート橋脚を対象に疑似損傷を与え、衝撃振動試験を実施した結果について記す。

2. 試験方法の概要

2.1 衝撃振動試験

衝撃振動試験は、図1に示すように、約300Nの重錘で構造物を打撃し、これにより発生する減衰自由振動を構

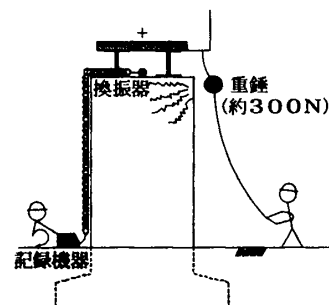


図1 作業概要

*1 (株)アーバン・エース 土木部 副課長 (正会員)

*2 (株)アーバン・エース 土木部 課長 工修

*3 (株)アーバン・エース 土木部 課長補佐

*4 (株)アーバン・エース 土木部 課長補佐 工修

造物に設置した複数の速度計（現状では最大8点）により計測する。固有振動数は、計測された振動速度波形をフーリエ変換し、振動スペクトルが卓越する振動数の内、位相差スペクトルが360度または180度を示すものを固有振動数として特定している。

2.2 固有値解析

固有値解析は、構造物をバネ質点系モデルに置換（地盤はバネに置換）し、解析で求まる固有振動数、振動モードおよびスペクトル振幅が実測で求めた固有振動数、振動モードおよびスペクトル振幅に一致するまで、地盤バネ定数および部材の曲げ剛性を変化させ、解析により定められた地盤バネ定数と部材の曲げ剛性の値により、健全性を評価するものである。

3. 実施内容

3.1 対象構造物

対象構造物は、昭和3年に構築後、70年以上鉄道構造物として供用されていた河川内橋脚である。基礎形式は直接基礎であり、橋脚躯体は高さ6.3mの無筋コンクリート構造である。なお、衝撃振動試験の実施時には、桁は既に撤去されており、また、撤去時の安定性確保のため、根固めが行われていた（図2.1、写真1参照）。さらに、既設橋脚には、コンクリートの打継ぎ目と思われる縁切れが生じていた（写真2参照）。

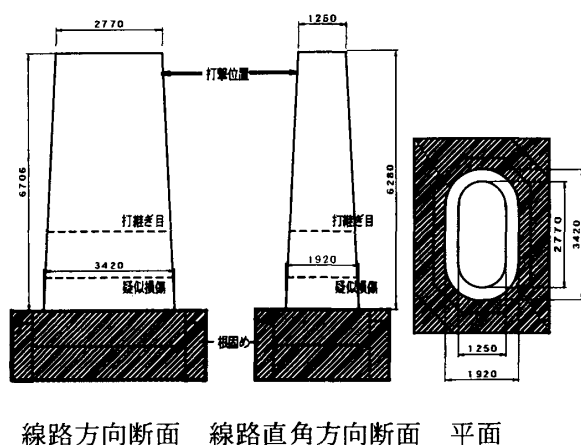


図 2.1 対象橋脚

3.2 疑似損傷の与え方

疑似損傷による躯体変形への影響を大きくするため、疑似損傷は橋脚下端より0.7mの位置に与えた（図2.1参照）。疑似クラックは、図2.2～2.5の平面図に示すように、コンクリートカッターで深さ10cmまで切断し、4段階で進行させる。疑似断面欠損は、疑似クラックを与えた箇所をコンクリートブレーカーで図2.6～2.7のように斫り、表面での幅が10cmとなる疑似断面欠損を段階的に進行させる（写真2参照）。

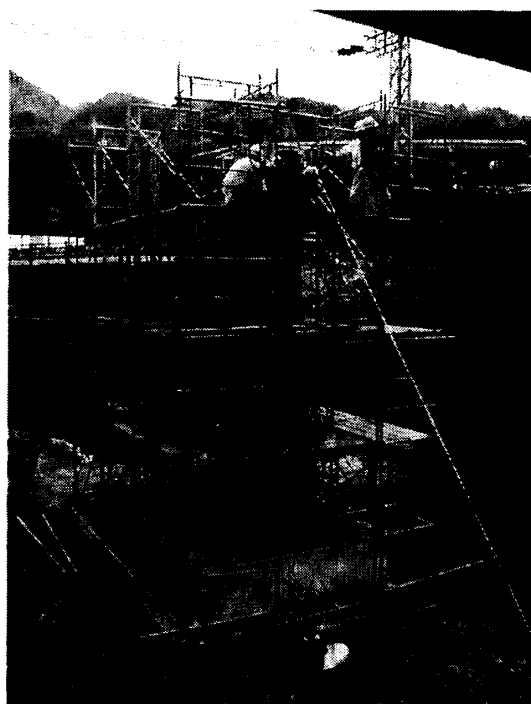


写真 1 対象橋脚



写真 2 損傷状況

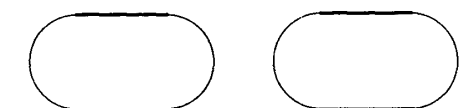


図 2.2 損傷 1



図 2.3 損傷 2



図 2.4 損傷 3



図 2.5 損傷 4

図 2.2～図 2.5 疑似クラック図

(太線は疑似クラック箇所を示す)



図 2.6 損傷 5



図 2.7 損傷 6

図 2.6～図 2.7 疑似断面欠損図

(太線は疑似断面欠損箇所を示す)

3.3 打撃方向

衝撃振動試験は、これまで基礎の安定性を評価するために用いられてきたが、基礎の影響を把握する場合は躯体の変形が生じない方が望ましいため、通常は線路直角方向を対象として行っている。しかし、今回の試験は躯体の損傷が構造物の健全性に与える影響の把握が目的であるため、各損傷段階における試験は損傷による剛性低下が大きいと想定される線路方向を対象に行い、現状と最終段階（損傷6）については、線路直角方向に対しても試験を行った。

4. 結果

4.1 実測結果

衝撃振動試験を行う際のピックアップの設置位置を図3に示す。通常の衝撃振動試験では、躯体天端・躯体下端付近、および中間点の計3点に設置する。今回の試験では疑似損傷部と打継ぎ部の影響を把握するために2点を追加し、計5点とした。

実測データによる固有振動数特定の例（線路方向）を図4.1～4.2に示す。なお、グラフは上から振動速度波形、振動スペクトル波形、位相

差スペクトル波形である。



線路方向測定時 線路直角方向測定時

図 3 ピックアップ設置位置

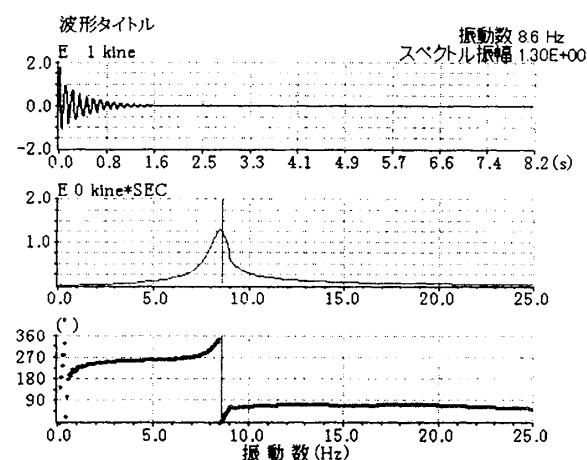


図 4.1 測点 D1・初期（固有振動数 8.6Hz）

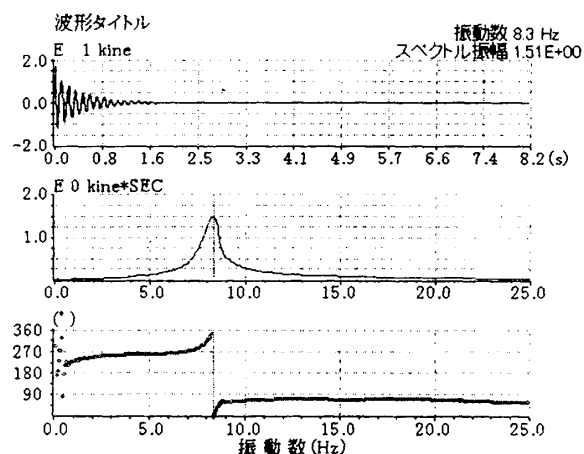


図 4.2 測点 D1・損傷 4（固有振動数 8.3Hz）

線路方向の測定結果を表1.1に示すが、全体的には損傷が大きくなるにつれ固有振動数が段階的に低減する傾向が表れている。したがって、初期値を測定しておくことにより、損傷による構造系への影響が把握できる可能性が高いと考

えられる。ただし、損傷5→損傷6では固有振動数が上がっており、原因の解明が必要である。

線路直角方向の測定結果を表1.2に示すが、線路直角方向においても、損傷により固有振動数が低下する傾向が表れている。しかし、固有振動数の低下割合は線路方向より小さくなった。

表 1.1 固有振動数の測定結果
(線路方向)

損傷状態	実測固有振動数 (Hz)
現状	8.6
損傷1	8.6
損傷2	8.5
損傷3	8.4
損傷4	8.3
損傷5	7.5
損傷6	7.8

表 1.2 固有振動数の測定結果
(線路直角方向)

損傷状態	実測固有振動数 (Hz)
現状	14.5
損傷6	14.2

4.2 固有値解析

4.2.1 躯体の設計値

今回の試験では、衝撃振動試験実施後にコアを採取し、一軸圧縮試験により圧縮強度(f'_c)を求めた。また、実用に際しては簡易的に測定する必要があることを考慮して、シュミットハンマーによる強度試験値(f'_c)も算出した。

$$f'_c = 30.2 \text{ (N/mm}^2\text{)}, f'_c = 30.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

シュミットハンマー試験による圧縮強度は、日本材料学会算定式³⁾により求めた。今回の試験では、両試験値が非常に近い値を示しており、シュミットハンマーによる強度試験値が妥当であると判断できた。今回の試験では、 f'_c を設計値とした。

静弾性係数(E_c)は、コンクリートの設計値

(f'_c)よりコンクリート構造物の設計標準⁴⁾を用いて求め、 $E_c = 28 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$ となる。今回の試験では、 E_c を弾性係数の設計値とする。

4.2.2 固有値解析の結果

固有値解析のモデル

を図5に示す。測定時のピックアップ設置位置に質点を設けたバネ質点系モデルを用いるが、今回の解析では高さ方向の断面変化を考慮して計7点とした。なお、根巻きを考慮し

て、バネはフーチングの上端に設定した。疑似損傷は要素4に、打継ぎ目は要素3に含まれる。

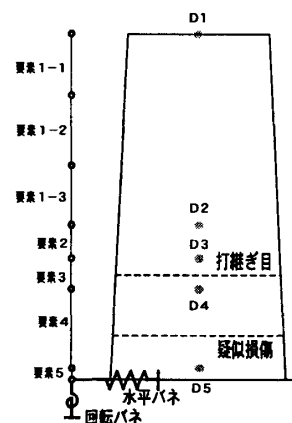


図 5 解析モデル

物性値の設定は、現状の固有値解析により地盤バネ定数と躯体剛性を定める。そして、損傷1～6各段階では、地盤バネ定数を固定して躯体剛性を変化させることにより、解析を行った。

現状(線路方向)の振動モードを図6に、現状におけるシミュレート倍率(=固有値解析で求まる解析値/設計値)を表2に示す。打継ぎ部以外では同一のシミュレート倍率を示しており、固有値解析による再現性の高さを表しているとともに、打継ぎ部での剛性低下が大きいと判断できる。

健全部のシミュレート倍率が、0.65となり1.0を大幅に下回っている。これは、長期経年後におけるコンクリートの弾性係数は設計基準による算定値よりも低くなる⁵⁾ことが影響していると考えられるが、定量的評価を行うためには、さらに多くの事例による検討が必要である。

各段階における要素3および要素4のシミュレート倍率並びに固有値解析で設定した固有振動数を表3.1に示す。損傷1～4については打継ぎ部での剛性低下のみが表れ、疑似クラックの影響は表れなかった。

打継ぎ部における剛性低下の進行は、疑似損傷を与える際の振動等により打継ぎ部の損傷が広がったことが原因である可能性が高いと考えられる。しかし、事前に打継ぎ部の内部状況を調査できなかったため、剛性低下の要因を定量的には評価できなかった。

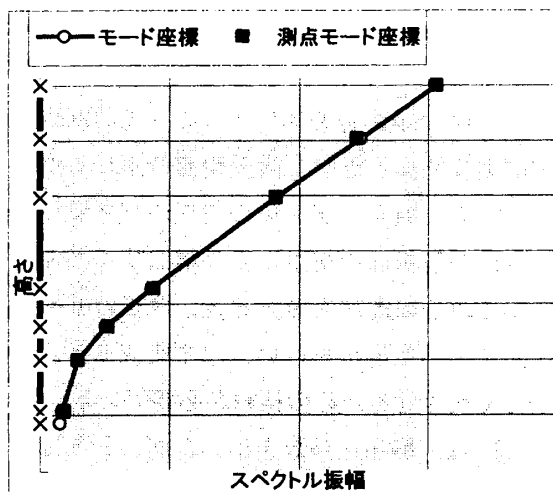


図6 現状の振動モード図

表2 曲げ剛性のシミュレート倍率

	線路方向 シミュレート倍率	線路直角方向 シミュレート倍率
要素1・2・4・5	0.65	0.65
要素3	0.08	0.11

表3.1 各損傷段階におけるシミュレート倍率

損傷 状態	シミュレート倍率		解析固有振 動数 (Hz)
	要素3	要素4	
現状	0.078	0.65	8.59
損傷1	0.078	0.65	8.59
損傷2	0.075	0.65	8.50
損傷3	0.072	0.65	8.41
損傷4	0.069	0.65	8.31
損傷5	0.049	0.61	7.50
損傷6	0.056	0.58	7.79

各段階の曲げ剛性の設計値は、現状の設計値で解析を行い、損傷による影響はシミュレート

倍率の低下で判断した。試験中に弾性係数の変化はないと考えられるため、断面二次モーメントの低下がシミュレート倍率の低下となって表れていると想定される。

損傷5では、疑似断面欠損による影響が表れている。損傷6の段階でも断面欠損部では剛性が低下しているが、要素3は損傷5より曲げ剛性を上げないと測定値と解析値が合わなかった。

なお、損傷4における振動モード図を図7.1に、疑似損傷部の影響が大きいと仮定して解析を行った結果を図7.2に示すが、図7.2ではD2、D3およびD4におけるスペクトル振幅が測定値に一致しない。したがって、打継ぎ部の影響により固有振動数が低下していることは確かであると推定される。

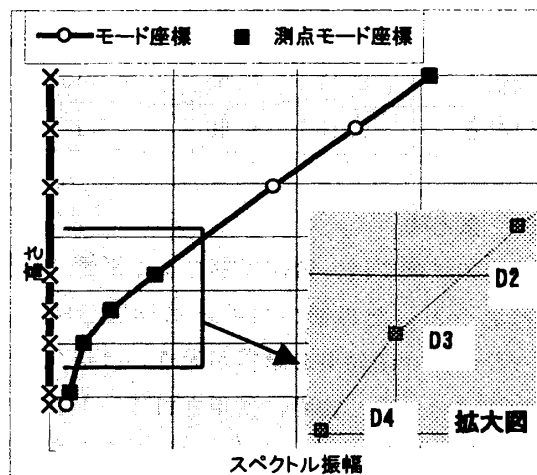


図7.1 損傷4における振動モード
(解析固有振動数 8.31Hz)

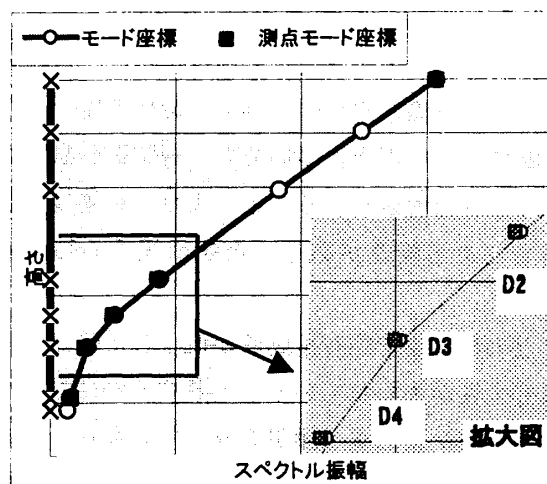


図7.2 疑似損傷部が影響すると仮定した場合
(解析固有振動数 8.31Hz)

損傷6で振動数が上がることは、断面減少により曲げ剛性が低下することを前提とすると実際の現象とは合わない。この現象をバネ質点モデルで解析することは困難であり、解析モデルの検討が今後の課題である。

線路直角方向におけるシミュレート倍率の変化を表3.2に示す。

要素4は線路方向と同程度の低下割合を示しているが、疑似損傷による断面二次モーメントの減少率（曲げ剛性の減少率）の違いを考慮すると、線路直角方向の方が疑似損傷による影響が大きく表れていると考えられる。

表 3.2 各損傷段階におけるシミュレート倍率

損傷 状態	シミュレート倍率		解析固有振 動数 (Hz)
	要素 3	要素 4	
現状	0.11	0.65	14.51
損傷 6	0.10	0.60	14.20

5. まとめ

今回の試験では、疑似損傷による影響の評価を行おうとした当初の目的とは異なる結果となったが、寸法効果の影響が大きいコンクリート構造について、実際に供用されていたコンクリート橋脚を対象に、損傷の進行が固有振動数の変化となって表れ、固有値解析により再現できることが確認できたことは、今後の検討を進めるうえで有意義な結果であったと考えられる。

さらに、損傷が散在している場合に、目視では各々の損傷が健全性に与える影響の度合いが判断できない場合についても、衝撃振動試験および固有値解析を行うことにより、影響度を判断できる可能性があることを示唆する結果となった。

どの程度まで固有振動数が低下した時点で構造健全性が失われていると判断するかについては、破壊に至るまで損傷を与えて試験を行う必要があるが、実構造物を対象にする場合は、試験時における安全性に問題が生じるため、実施は困難である。したがって、供試体での実験を

重ね、実構造物で今回程度の損傷を与えた場合の結果との整合性を向上させるための検討を進める必要がある。

損傷が進んだ場合に固有振動数が上がる現象は、部材断面の中立軸の変化や、クラック発生段階の正負交番挙動時において圧縮側と引張側で異なる挙動を示すコンクリートの特性を適切に評価できる解析手法による検討が必要である。また、今回の試験では、疑似損傷や打継ぎ部を長さが数10cmの線要素における平均的な剛性低下により把握したが、微少範囲で生じるクラックや断面欠損を、測点数の増加やバネ質点モデル以外の解析法の適用により解明する必要がある。これらの課題を考えると、今後はFEMモデルを用いた解析も行い、バネ質点モデルに適切に反映させるための検討が必要である。

今回は、静弾性係数を用いたが、シミュレート倍率は1.0を下回る結果となった。実際の挙動を考慮すると、初期弾性係数を用いることも検討すべきであるが、今回の試験では静弾性係数を用いる方が実態に近い値を示すことになるため、弾性係数の設定も今後の検討課題である。

今回の試験では多くの検討課題を残したが、今後さらに多くの試験を行い、部材損傷と固有振動数の関係を把握していく必要がある。

参考文献

- 1) 西村昭彦, 羽矢洋: 衝撃振動試験による橋脚の健全度判定法, 土木学会誌, pp. 26-28, 1993. 8
- 2) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告 Vol. 3, No. 8, pp. 41-49, 1989. 8
- 3) 岡田清, 六車熙編・コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 運輸省鉄道局監修, 丸善, 1992
- 5) 藤井学, 宮川豊章ほか: 24年間供用された構造物の材料特性, セメント・コンクリート, No. 554, pp. 35-43, 1993. 4