

# 重錘打撃試験による 立体ラーメン高架橋の損傷検知

庄 健介<sup>1</sup>・山崎裕史<sup>2</sup>・北村泰寿<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 阪急電鉄株式会社 技術部 (〒530-8389 大阪市北区芝田一丁目16番1号)

E-mail: sho @hankyu.co.jp

<sup>2</sup>学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

供用中の構造物の振動特性を簡便に調べる方法に重錘による打撃試験がある。この試験は橋脚の健全性一次診断法として、重錘打撃による橋脚の実測応答波形が解析モデルを用いて計算した計算応答波形と一致するように部材のヤング係数や支持地盤の地盤ばね定数等の諸定数を推定し、この推定値と設計値とを比較することにより、橋脚の健全性を判定する方法である。本研究では、この方法を立体ラーメン高架橋の損傷診断に応用することを意図して、撤去予定の立体ラーメン高架橋に段階的に損傷を与えながら重錘による打撃試験を実施し、立体ラーメン高架橋に与えた損傷を検知する方法について検討した。

**Key Words :** soundness estimation, percussion test, structural identification

## 1. はじめに

構造物の維持管理は、一般に図-1に示す手順で行われている<sup>1)</sup>。本研究では、初期検査、定期検査、臨時検査の結果に基づき、詳細検査を必要とするか否かの判断を下すまでの一次診断を対象とする。

最近では、供用中の構造物の振動特性を簡便に調べる方法として、構造物を軽量の重錘等で打撃し、実測の応答波形から固有振動数を特定する方法が開発されている<sup>2,3,4)</sup>。西村は<sup>5,6)</sup>、300 N程度の重錘を加振源とした試験器を開発し、「衝撃振動試験」としてJR各社の保有する鉄筋コンクリート橋脚及び鉄筋コンクリート高架橋の測定結果をもとに、統計的手法を用いて構造物の健全性評価のための判定指標を提案している。この試験器及び判定指標はJR各社で広く採用され<sup>7,8)</sup>、阪神大震災後の復旧構造物に対する安全確認検査にも採用された<sup>9)</sup>。

筆者らは、実測の重錘打撃力<sup>10)</sup>を加振力として、構造物の解析モデルに対する固有振動数と動的応答波形を求め、実測の固有振動数と応答波形を対比することにより、構造物の健全性を判定する健全性一次診断法を提案している<sup>11)</sup>。実測した重錘打撃力を加振力とした動的応答解析による波形と実測応答波形を対比するため、西村らが提案している固有振動数に対するスペ

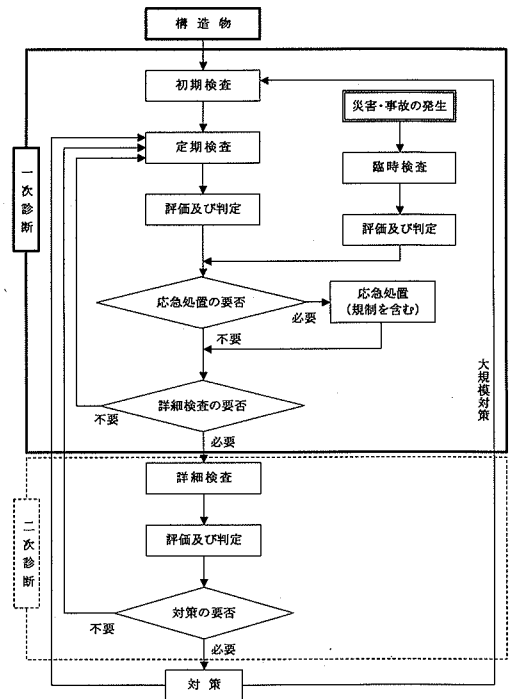


図-1 構造物管理の手順

クトル値を用いて描かれる振動モードを用いる方法<sup>9</sup>より実際に近い取扱いとなる。本論文では、この分野で普及している衝撃振動試験との混同を避けるため、重錘打撃試験<sup>10</sup>と称する。

都市部の鉄道高架橋で多く採用されている立体ラーメン形式の鉄筋コンクリート高架橋に対する健全性診断として、関ら<sup>12)</sup>は兵庫県南部地震により被害を受けたラーメン高架橋に衝撃振動試験を実施し、ラーメン高架橋全体を重錘で打撃したときに得られる全体系1次固有振動数と損傷が認められる柱の中央を掛矢で打撃することにより得られる柱の部分系2次固有振動数の2つの固有振動数に注目し、高架橋の2次元ばねマス系振動モデルを用いた固有振動解析により算出される固有振動数が、実測した固有振動数と一致するように試行錯誤的に柱の剛性と地盤ばねを推定する方法を検討している。この方法では、柱の部分系2次固有振動数を測定するために、個々の柱を掛矢により直接打撃する必要がある。都市部の高架橋に見られるように、高架下利用により柱が化粧板等で被覆されている場合には、化粧板の撤去工事等が発生し、大掛かりとなる。このため、テナントへの影響を最小限に損傷部位を推定する方法が求められている。

本研究では、立体ラーメン形式の鉄筋コンクリート高架橋を対象に、重錘打撃試験により部材損傷の程度を推定することを意図して、撤去予定の3径間立体ラーメン高架橋に人工的に損傷を与え、これに重錘打撃試験を実施した。また、立体ラーメン高架橋を3次元骨組みにモデル化し、このモデルを用いて重錘打撃試験で測定した重錘打撃力波形<sup>10</sup>を加振力とする動的応答解析を行い、解析応答波形と測定応答波形を比較することにより、高架橋の損傷同定を実施した。動的応答解析に用いた重錘打撃力波形の一例を図-2に示す。動的応答解析では、タイムステップを0.0001秒として重錘打撃力を入力した。

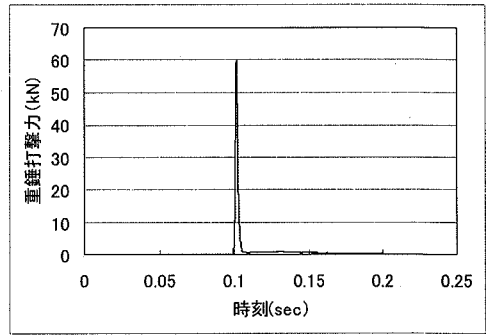


図-2 重錘打撃力波形の一例

本論文では、この実験結果及び損傷同定結果をもとに、立体ラーメン高架橋の健全性一次診断への重錘打撃試験の適用について検討する。

## 2. 人工損傷実験

### (1) 実験の概要

写真-1は、実験を行った高架橋で、鉄道を跨ぐ跨線道路橋の取付け部分にある(1932年建造)。構造形式は、図-3に示すように2柱式3径間連続の鉄筋コンクリート立

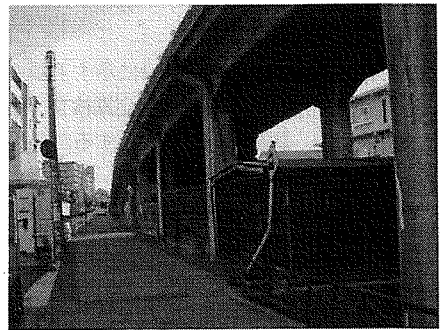


写真-1 実験対象高架橋

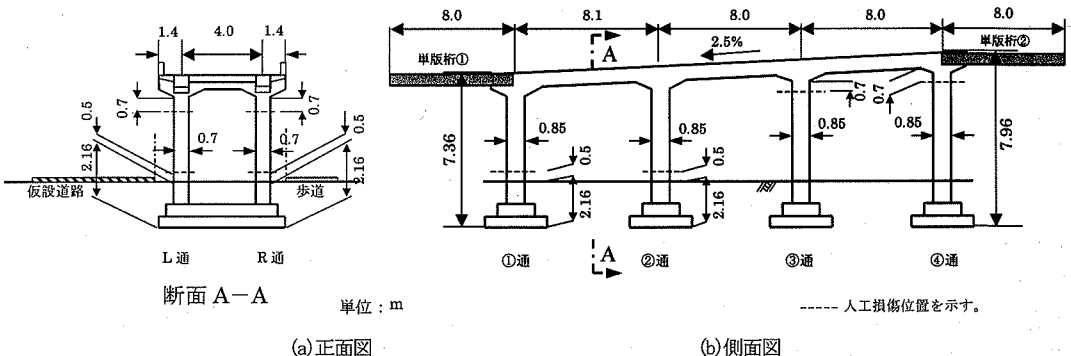


図-3 高架橋の概要

体ラーメンで、道路縦断方向のスパンが約8.0m、道路直角方向のスパンが4.0mである。基礎形式は、直接基礎で道路直角方向のみ地中梁により結合されている。

人工損傷実験に先立ち、RCレーダーを用いて柱の配筋状況を確認した。これによると、主筋は、 $\phi 28\text{mm}$ が1段配筋で26本配置されていた。主筋間隔は、75mm～115mmの範囲でばらつきが見られ、主筋のかぶりは35mm～100mmの範囲で柱の側面毎に異なっていた。また、帯鉄筋の間隔は、300mm～350mmであった。実験終了後に、柱、梁、スラブの各部材からコア抜き取り供試体（ $\phi 100\text{mm}$ ）を2本ずつ採取し、圧縮強度試験を行った。この試験結果を表-1に示す。コア抜き取り供試体の採取にあたっては、鉄筋を避ける必要があり、供試体の径を $\phi 100\text{mm}$ としたため、圧縮強度試験結果は骨材の影響を受け、ばらつきが生じた。一方、コア抜き取り試験と同時に実施した柱の反発硬度試験の基準硬度は、40～46の範囲にあり、上下限値を除いた値の平均値は、いずれの部材も42でばらつきは見られなかった。これらの試験結果を踏まえて、コンクリート部材の部材定数として、表-1に示す供試体試験結果のうち、上下限値を除いたスラブ1、梁2、柱1の試験値を平均した値を用いる。コンクリートの静弾性係数（ヤング係数）は $E_c=2.04 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、平均のポアソン比は $\nu=0.14$ である。

表-1 コア抜き取り試験結果

	コアの形状(mm)		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	静弾性係数 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$	ポアソン比
	直径	高さ			
スラブ1	99.6	160.8	32.6	2.070	0.142
スラブ2	99.6	167.1	40.5	4.020	0.233
梁1	99.6	192.8	17.1	1.400	0.095
梁2	99.6	190.5	28.1	2.060	0.142
柱1	99.5	185.7	25.6	1.990	0.134
柱2	99.5	193.6	23.9	2.000	0.087

この高架橋が道路拡幅に伴い撤去されることとなったため、両側に架設されている単版桁を順次撤去した後、不同沈下や地震による亀裂損傷を想定して柱部にウォール・ソーを用いて切込み損傷を入れながら、損傷評価のために重錘打撃試験を実施した。

人工損傷実験では、図-3において②通り柱の下端部と③通り柱の上端部をウォール・ソーにより段階的に切断し（写真-2参照）、損傷段階毎に重錘打撃試験を実施した。重錘打撃試験における重錘打撃位置及び測点位置と切込み範囲を図-4及び表-2に示す。切断は高架橋に平行して走る仮設道路（図-3参照）への安全のため、図-4に示すように、②通り柱の下部については、2本の柱の道路方向側面に両側から同時に切込みを入れた後、最終段階（表-2、Step4）で全周に20cmの切込み損傷を与えた。一方、③通り柱の上部では、道路直角方向の側面に両側から同時切込みを入れた。

## (2) 実験結果

人工損傷実験で、損傷段階毎に重錘打撃試験から得ら

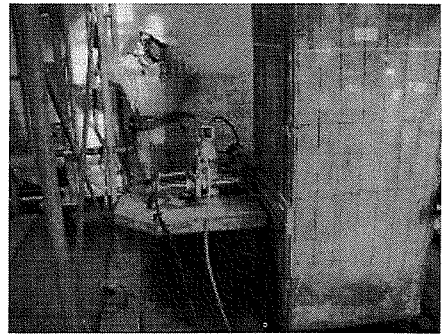


写真-2 ウォール・ソーによる切断状況

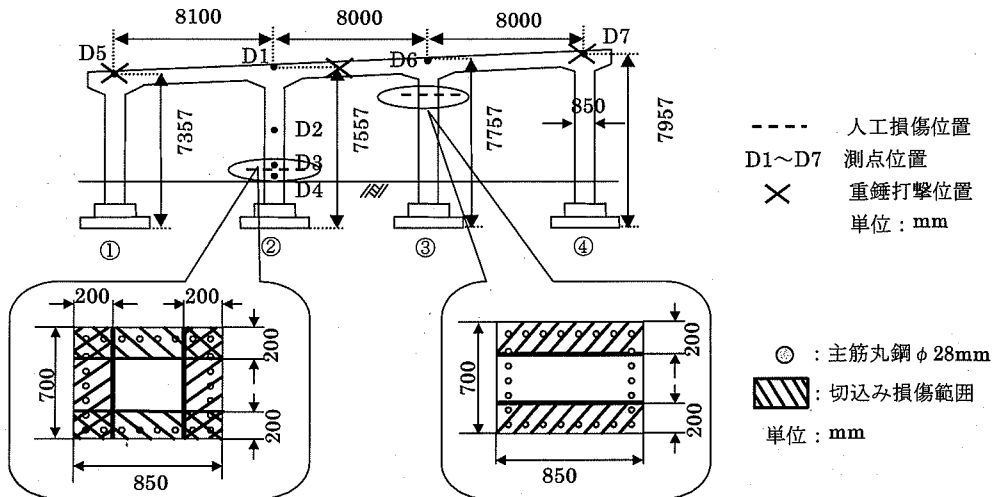


図-4 損傷実験の概要

れる固有振動数の値を表-2に示す。また、損傷前と②通り、③通りの柱に最終段階の損傷(Step4)を与えた後の応答波形、フーリエ振幅スペクトル、位相角を図-5~8に示す。同図は、高架橋の道路方向及び道路直角方向スパンの中央部を打撃した場合の打撃点近傍の測点(D1)の

結果における速度波形と分析結果である。測点は立体ラーメン高架橋の柱天端(スラブ部)に設け、重錘打撃方向の応答成分を計測した(図-4参照)。また、ノイズの影響を除去するため、10回分の重錘打撃応答波形を重ね合わせている。

表-2 人工損傷による固有振動数の変化

(a)各損傷ステップの固有振動数

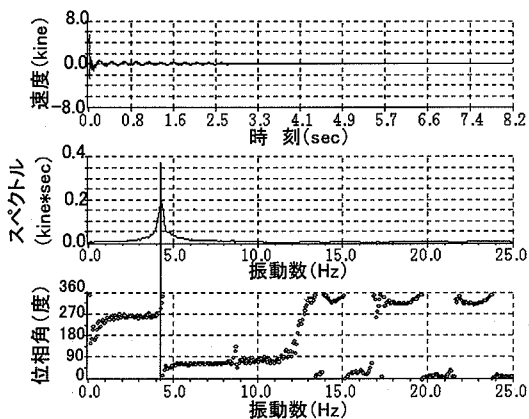
損傷ステップ	固有振動数		
	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)
初期状態	3.78	-	-
単版桁①撤去	3.54	-	-
単版桁②撤去	3.42	4.26	4.76
Step1	3.51	4.30	4.67
Step2	3.51	4.23	4.63
Step3	3.30	4.20	4.65
Step4	3.30	4.15	4.65

(b)人工損傷の内容

人工損傷 Step	損傷状況
Step1	②通り R 通側柱を両側から道路方向に 20cm 切断
Step2	②通り L 通側柱を両側から道路方向に 20cm 切断
Step3	③通り 両側の柱を両側から道路直角方向に 20cm 切断
Step4	②通り 両側の柱を全周にわたり 20cm 切断

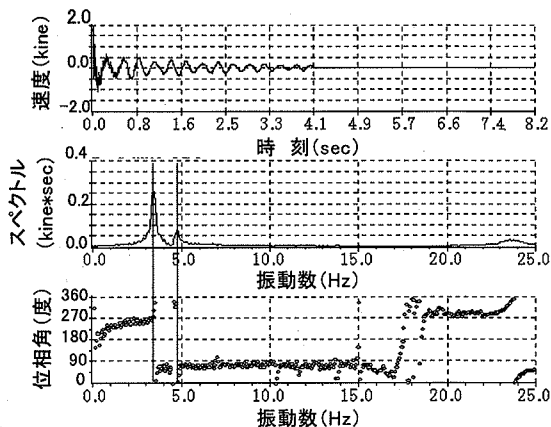
(c)固有振動モードと固有振動数

固有振動モード		固有振動数
1 次モード	道路直角方向断面の最低次モード	$f_1$
2 次モード	道路縦断方向の最低次モード	$f_2$
3 次モード	鉛直軸回りの最低次モード	$f_3$



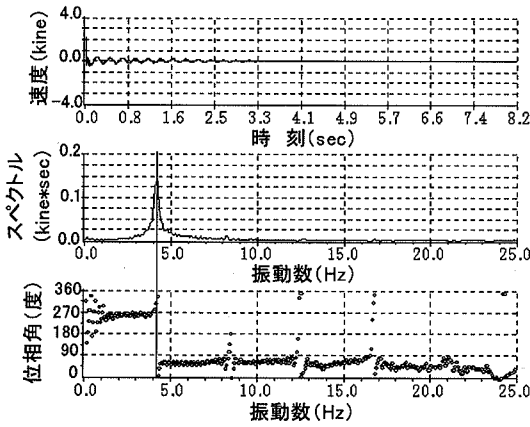
2 次固有振動数 4.26Hz

図-5 道路方向打撃 (単版桁②撤去後)



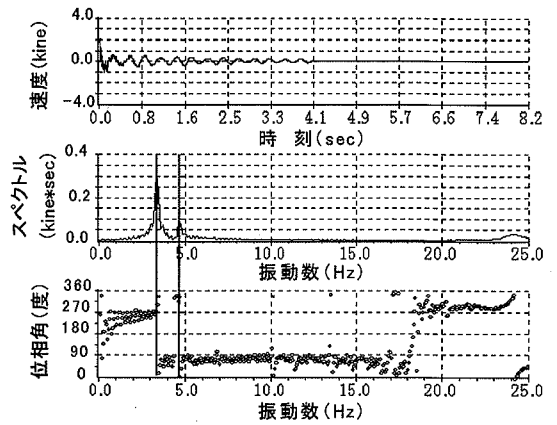
1 次固有振動数 3.42Hz 3 次固有振動数 4.76Hz

図-6 道路直角方向打撃 (単版桁②撤去後)



2次固有振動数 4.15Hz

図-7 道路方向打撃 (Step4損傷後)



1次固有振動数 3.30Hz 3次固有振動数 4.65Hz

図-8 道路直角方向打撃 (Step4損傷後)

### 3. 損傷同定

人工損傷を与える前に実施した重錘打撃試験結果を用いて、立体ラーメン高架橋の構造同定を行う。ラーメン部材の弾性係数、ポアソン比、単位体積重量はコアー抜き取り試験結果を用いるため、構造同定は地盤ばね定数を同定することになる。

構造同定を行った立体ラーメン高架橋の解析モデルに、実構造物に与えた人工損傷と同等の損傷を断面積、断面2次モーメントの低下として与え、応答解析を行う。解析応答波形と実測応答波形を比較して、損傷の存在を同定する（以下、損傷同定と呼ぶ）。

#### (1) 構造同定

ラーメン高架橋の構造同定を行うための解析モデルを図-9に示す。解析モデルは、柱、梁、地中梁を骨組み要素に、地盤反力を地盤ばねにモデル化した3次元立体

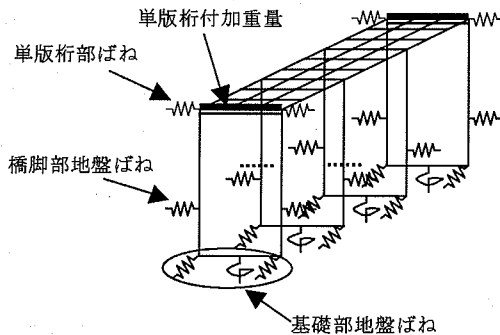
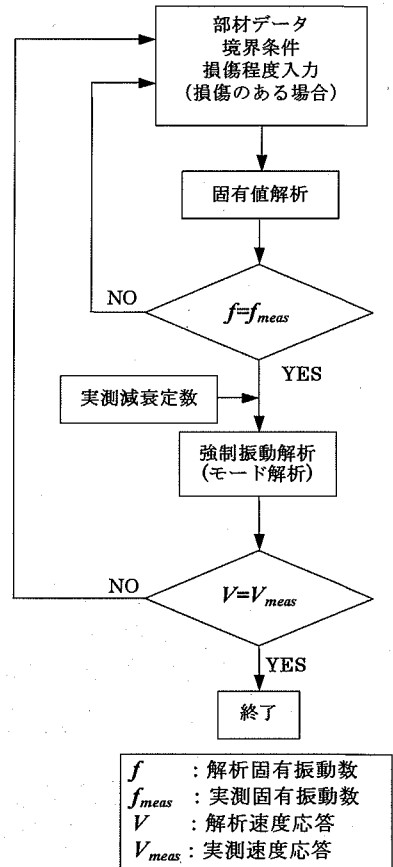


図-9 構造同定モデル

骨組みである。スラブは、縦梁、横梁と格子状に剛結される複数の小梁としてモデル化する。

この解析モデルを用いた構造同定の手順を図-10に示



$f$  : 解析固有振動数  
 $f_{meas}$  : 実測固有振動数  
 $V$  : 解析速度応答  
 $V_{meas}$  : 実測速度応答

図-10 構造同定及び損傷同定の手順

す。構造同定に際しては、まず両側の単版桁が撤去された状態の立体ラーメン高架橋について構造同定を行い、①～④通りの地盤ばね定数を求めた。

立体ラーメン高架橋の解析応答波形と実測応答波形との差異を定量的に評価するため、次式で表されるJ値<sup>13)</sup>を用いる。

$$J = \int_0^1 \{x_1(t) - x_0(t)\}^2 dt / \int_0^1 \{x_0(t)\}^2 dt \quad (1)$$

ここで、 $x_0$ は実測応答波形、 $x_1$ は構造同定した解析モデルによる解析応答波形である。また、 $t_0$ と $t_1$ はそれぞれ波形の差異を判定しようとする区間の開始時刻と終了時刻である。J値が小さいほど比較しようとする2つの波形の差異は小さいことになり、完全に一致する場合にはJ値は0となる。ここでは、全解析時間を対象として、 $t_0$ と $t_1$ をそれぞれ0secと2.0sec、時間間隔を0.002secとした。なお、J値の計算に用いた実測応答波形は、同定に不要な高次振動数成分を除去するため、10Hzのローパスフィルターを通過させた波形（以下、図の凡例で”fil”と表示）を用いている。計算したJ値は、応答波形を比較する各図に併記している。

本高架橋は老朽化が激しく、写真-3に示すように、人工損傷実験の実施前に、すでに一部の部材に鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの剥落や亀裂が発生していた。このため、構造同定に際して、これらの損傷程度を目視によるひびわれ調査結果を参考に決定した。

図-11は、コンクリートの剥離がないものとし、スパン中央を橋軸直角方向に打撃した場合（図-4参照）について、実測応答波形と解析応答波形を実測の測点位置(D1)で比較したものである。なお、動的応答解析では、実測の重錘打撃力波形を加振力として用い、3次モードまで用いたモーダルアナリシスによって応答波形を計算した。

同図に示す解析固有振動数は、表-2に単版桁②撤去後の固有振動数として示した実測固有振動数に比べて、1～3次固有振動数の全てにおいて大きな値として算出

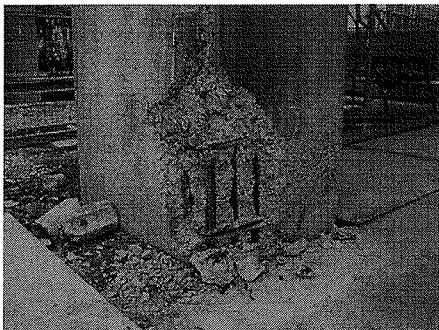


写真-3 かぶりコンクリート剥離の状況

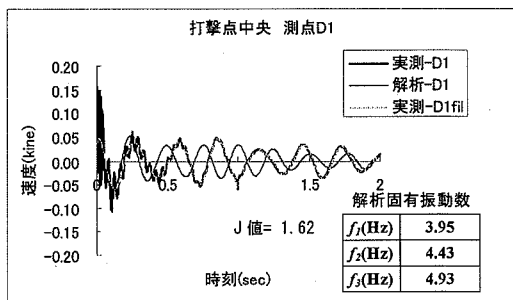


図-11 剥離損傷を考慮しない場合の応答波形の比較

されており、解析応答波形も実測波形と大きくかけ離れている。この場合のJ値は、1.62で大きな値を与えているが、構造同定においてコンクリート剥離の影響を無視したためであると考えられる。

図-12、13にコンクリートの剥離を考慮したときの応答波形の比較を示す。これらの図から、橋軸方向、橋軸直角方向のいずれの打撃方向、いずれの測点においても、解析応答波形は実測応答波形とよく対応していることがわかる。J値は $3.26 \times 10^{-2} \sim 8.06 \times 10^{-2}$ の範囲にあり、D1測点のJ値は1.62から $4.24 \times 10^{-2}$ に減少しており、コンクリートの剥離を考慮することによってモデルの大幅な改善が行われている。表-3に構造同定した地盤ばね定数とかぶりコンクリートの損傷範囲を示す。

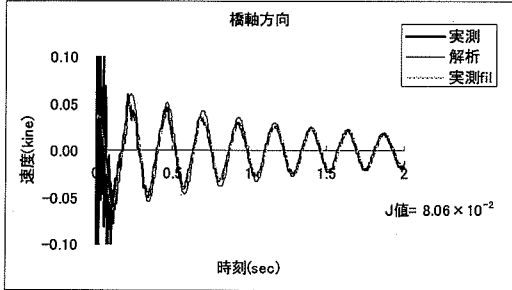
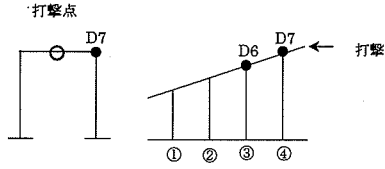
つぎに、この立体ラーメン高架橋に単版桁が設置されている状態をモデル化するため、単版桁の反力相当分を重量として桁受け部の梁に付加し、単版桁の剛性と支承の剛性を立体ラーメン高架橋両端部に水平ばねを付加することによりモデル化する（図-9参照）。このモデルを用いて、前述と同様に、単版桁①、②が設置されている状態の解析応答波形が、各々の状態における実測応答波形と一致するよう試行錯誤的に立体ラーメン高架橋両端部のばね定数を推定する。推定結果を表-4に示す。

図-14は、単版桁①、②が設置されている初期状態における実測応答波形と解析応答波形を比較したものであり、図-15は単版桁①が撤去され、単版桁②のみが設置されている状態について比較したものである。図-14、15では、いずれの測点においても、解析応答波形と実測応答波形はよい対応を示しており、人工損傷を与える前の現状の立体ラーメン高架橋に対する構造同定が完了した。

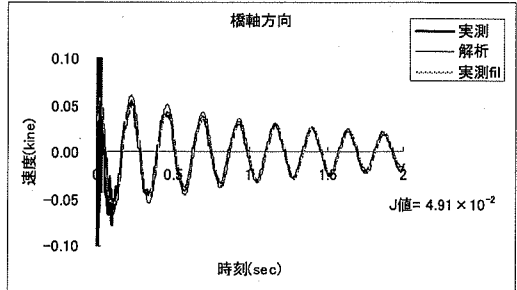
以上のことを踏まえて、ウォール・ソーにより人工的に損傷を与えた高架橋の損傷同定を行う。

## (2) 損傷同定

ウォール・ソーを用いて段階的に柱に切込み損傷を与えた状態を表現するため、柱の損傷部分の断面積、断面

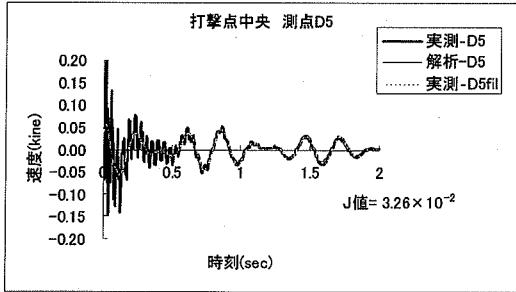
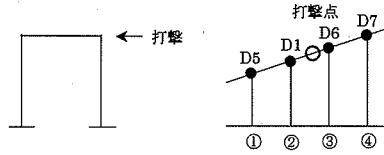


(a) ④通り天端(D7)

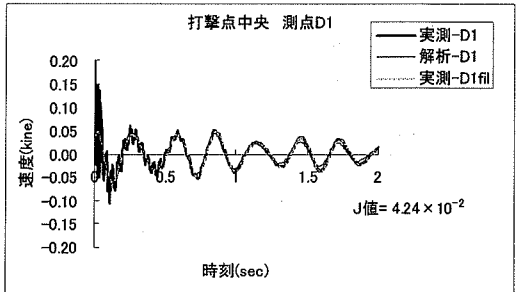


(b) ③通り天端(D6)

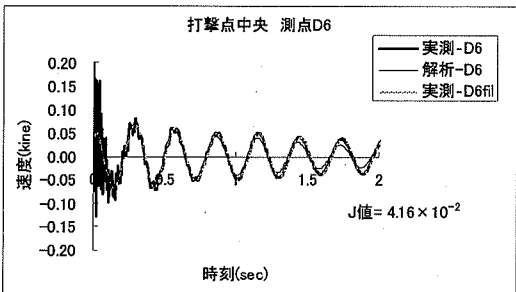
図-12 構造同定における応答波形の比較 (④通りのスパン中央を道路方向に打撃)



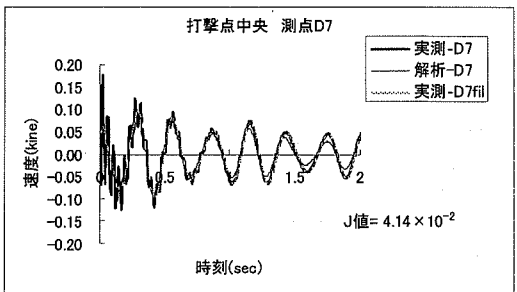
(a) ①通り天端



(b) ②通り天端



(c) ③通り天端

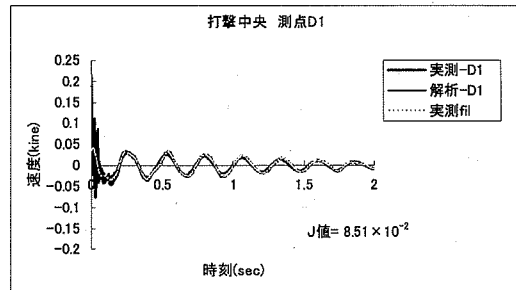
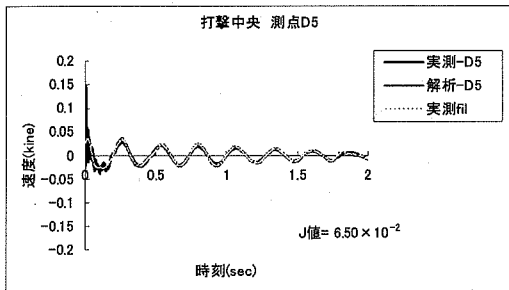
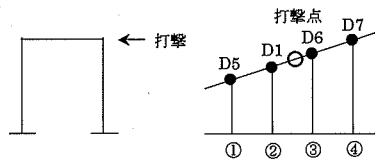
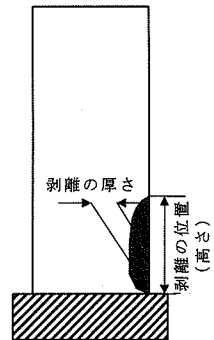


(d) ④通り天端

図-13 構造同定結果 (スパン中央を道路直角方向に打撃)

表-3 地盤ばね定数の同定結果

	①通	②通	③通	④通
ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> )	$2.04 \times 10^7$	$2.04 \times 10^7$	$2.04 \times 10^7$	$2.04 \times 10^7$
ポアソン比	0.14	0.14	0.14	0.14
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	25	25	25	25
橋脚部				
橋軸方向バネ定数(kN/m)	$7.06 \times 10^5$	$7.12 \times 10^5$	$7.08 \times 10^5$	$7.00 \times 10^5$
橋軸直角方向バネ定数(kN/m)	$15.3 \times 10^5$	$14.5 \times 10^5$	$14.2 \times 10^5$	$15.2 \times 10^5$
基礎部				
両端橋軸方向バネ定数(kN/m)	$8.36 \times 10^5$	$8.31 \times 10^5$	$8.32 \times 10^5$	$7.82 \times 10^5$
両端橋軸直角方向バネ定数(kN/m)	$27.0 \times 10^5$	$26.4 \times 10^5$	$25.8 \times 10^5$	$28.7 \times 10^5$
両端鉛直方向バネ定数(kN/m)	$3.84 \times 10^5$	$3.84 \times 10^5$	$3.84 \times 10^5$	$3.84 \times 10^5$
両端橋軸方向回転バネ定数(kN・m/rad)	$3.04 \times 10^5$	$3.04 \times 10^5$	$3.04 \times 10^5$	$3.04 \times 10^5$
両端橋軸直角方向回転バネ定数(kN・m/rad)	$11.6 \times 10^5$	$11.6 \times 10^5$	$11.6 \times 10^5$	$11.6 \times 10^5$
中央橋軸方向バネ定数(kN/m)	$9.62 \times 10^5$	$9.57 \times 10^5$	$9.57 \times 10^5$	$9.00 \times 10^5$
中央橋軸直角方向バネ定数(kN/m)	$74.7 \times 10^5$	$73.8 \times 10^5$	$72.2 \times 10^5$	$73.6 \times 10^5$
中央鉛直方向バネ定数(kN/m)	$5.76 \times 10^5$	$5.76 \times 10^5$	$5.76 \times 10^5$	$5.76 \times 10^5$
中央橋軸方向回転バネ定数(kN・m/rad)	$6.09 \times 10^5$	$6.09 \times 10^5$	$6.09 \times 10^5$	$6.09 \times 10^5$
中央橋軸直角方向回転バネ定数(kN・m/rad)	$34.8 \times 10^5$	$34.8 \times 10^5$	$34.8 \times 10^5$	$34.8 \times 10^5$
かぶりコンクリート剥離				
剥離を有する部材	両柱	両柱	両柱	両柱
剥離の位置 (m)	下端 0.75 から 3.5	下端からの高さ 4.7	下端からの高さ 4.9	下端からの高さ 2.5
剥離の厚さ (cm) (表面からの深さ)	橋軸方向 5.0	橋軸直角方向 8.5	橋軸直角方向 8.5	橋軸方向 6.5 橋軸直角方向 5.0

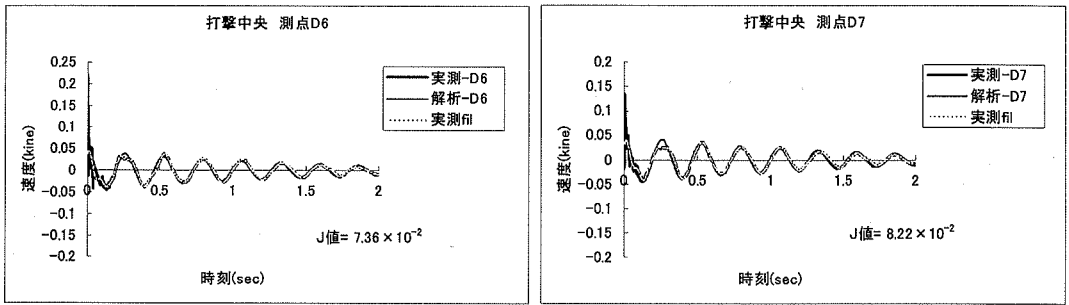


(a)①通り天端

(b)②通り天端

図-14 単版桁①, ②設置状態における構造同定結果 (スパン中央を道路直角方向に打撃)

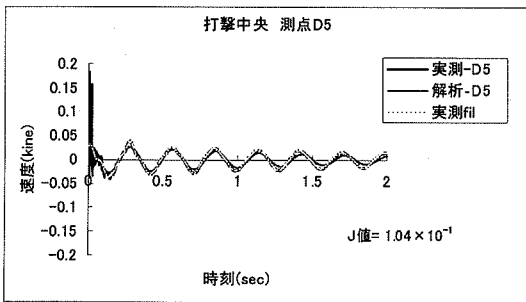
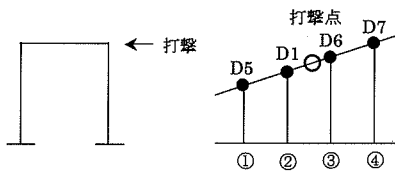




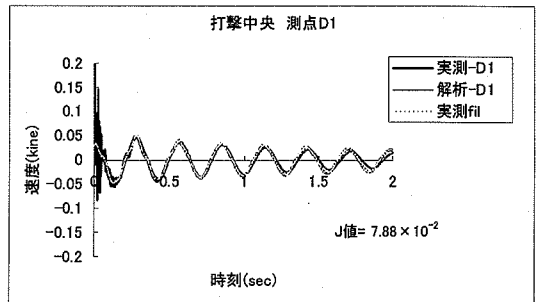
(c)③通り天端

(d)④通り天端

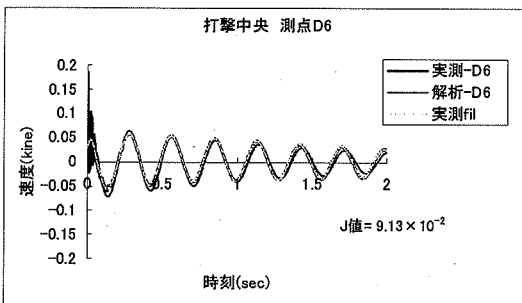
図-14 単版桁①, ②設置状態における構造同定結果 (スパン中央を道路直角方向に打撃) (つづき)



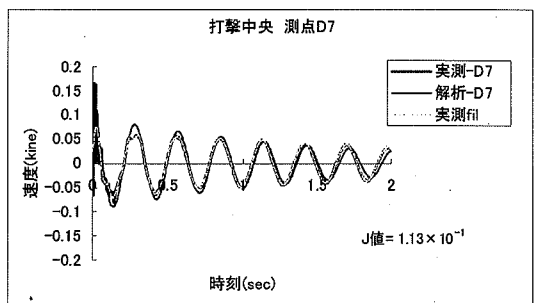
(a)①通り天端



(b)②通り天端



(c)③通り天端



(d)④通り天端

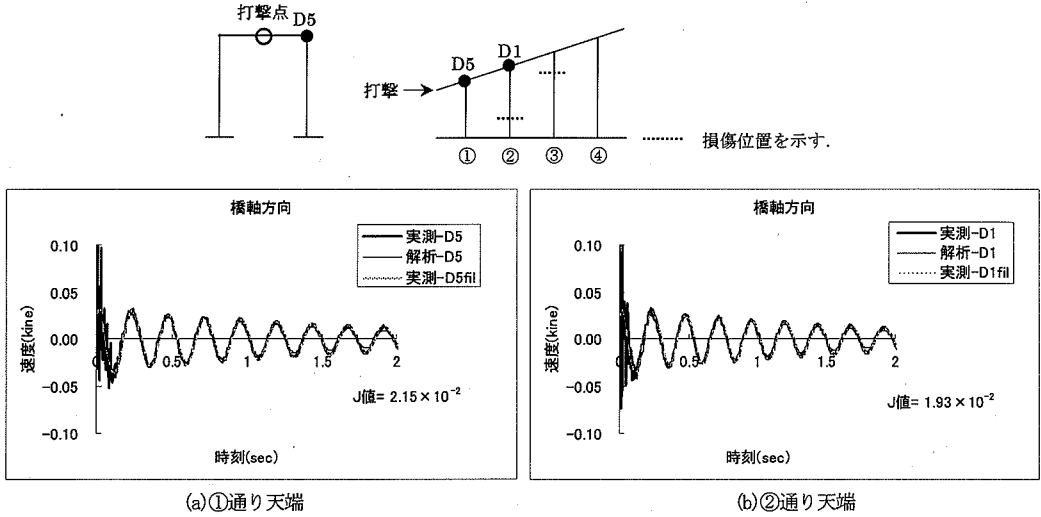
図-15 単版桁①を撤去した状態における構造同定結果 (スパン中央を道路直角方向に打撃)

表-4 単版桁の同定結果

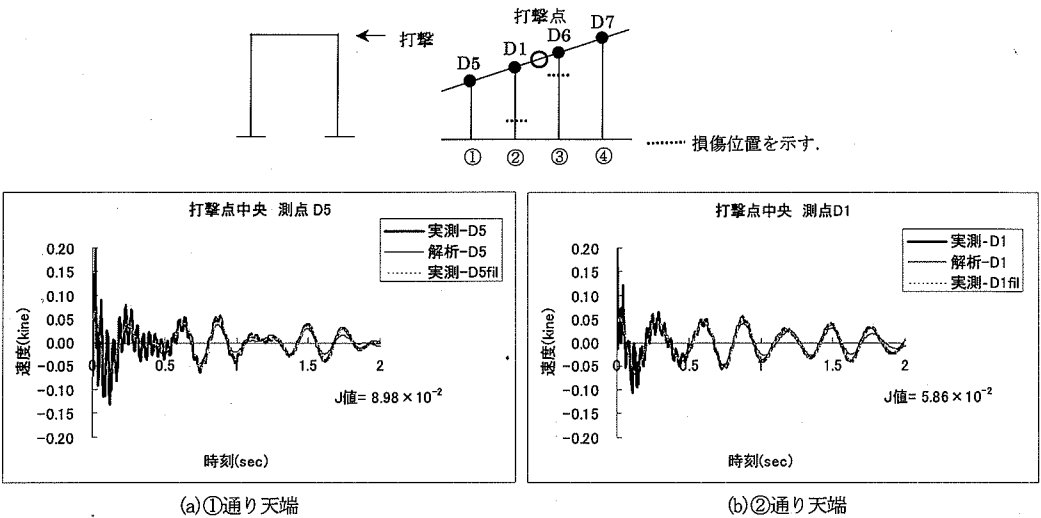
	単版桁①	単版桁②
単版桁付加重量 (kN/m <sup>3</sup> )	27.9	27.9
単版部水平ばね定数 (kN/m)	6000	9000

2次モーメントを切込み深さに合わせて低下させた。前項で構造同定した解析モデルに損傷を与えたときの解析応答波形と実測応答波形の比較を図-16, 17 に示す。同図は、単版桁①, ②を撤去した状態で、②通りと③通りに人工損傷を与えた最終段階の損傷状態に対する結果である。図中にJ値と10Hzのローパスフィルターを通過させた波形(図の凡例で“fil”と表示)を併記した。同

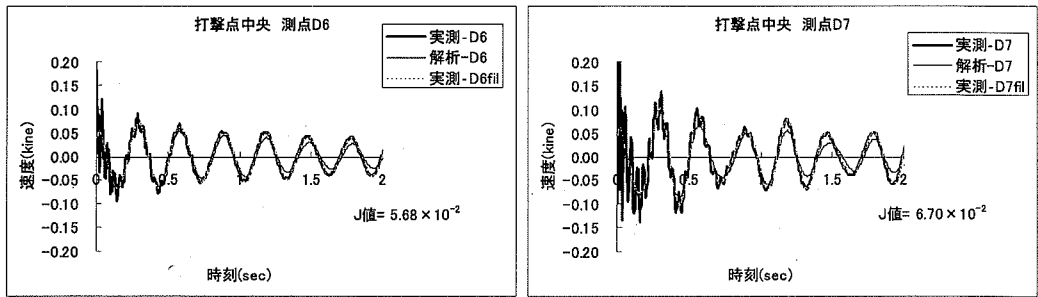
図において、いずれの解析応答波形も実測応答波形と良い対応をしており、J値も  $1.93 \times 10^{-2} \sim 8.98 \times 10^{-2}$  の範囲にある。立体ラーメン高架橋損傷実験の結果は、構造同定した解析モデルに損傷を断面積、断面2次モーメントの低下として与えることによって、精度良く表現できることが明らかとなった。このことは、立体ラーメン高架橋を3次元立体骨組みによりモデル化し、図-10 に示す



(a) ①通り天端 (b) ②通り天端  
 図-16 損傷同定における応答波形の比較 (①通りのスパン中央を道路方向に打撃)



(a) ①通り天端 (b) ②通り天端  
 図-17 損傷同定における応答波形の比較 (スパン中央を道路直角方向に打撃)



(a) ③通り天端

(d) ④通り天端

図-17 損傷同定における応答波形の比較 (スパン中央を道路直角方向に打撃) (つづき)

手順に従って損傷同定を行うことで、立体ラーメン高架橋の部材損傷に対する診断がある程度可能であることを示唆している。

#### 4. 損傷を受けた立体ラーメン高架橋の重錘打撃応答特性

実構造物にウォール・ソー等を用いて人工的に損傷を与え、損傷を受けた構造物の重錘打撃による応答特性を調べる実験では、現場の安全管理上の問題もあり、与える損傷の程度には限界がある。そこで、先に構造同定した解析モデルに対して、損傷の程度に応じて断面積、断面2次モーメント等を変化させる。また、損傷の位置や程度も変化させて、損傷を受けた立体ラーメン高架橋の重錘打撃応答特性について、数値実験により検討する。なお、ここでは、単版桁①、②が設置された状態で、鉄筋腐食によるコンクリートの剥離がない無損傷の場合に

対する解析モデルを用いる。

地震等による損傷を想定して、柱の端部が同時に損傷した場合について重錘打撃応答特性を調べる。損傷の程度は、柱側面の両側から20cmの切込みを入れた場合と同等とした。立体ラーメン高架橋の1次～3次固有振動数の変化を図-18に示す。また、立体ラーメン高架橋のスパン中央部を道路直角方向に打撃した場合の①～④通りの柱天端の測点(図-4のD5, D1, D6, D7)における重錘打撃方向の解析応答波形の変化に注目する。①～④通りの柱天端の測点(D5, D1, D6, D7)における損傷前後の波形を用いて計算したJ値(J1, J2, J3, J4)を図-18に併記した。

同図から、一様損傷を受ける箇所が増えるにつれて、1次～3次の固有振動数は減少していることが窺えるが、その変化は全ての部位に損傷を受けた(d)の場合でさえ、0.17～0.83Hz程度の減少である。また、一様損傷の部位が柱下部の1箇所の場合である(a)では、0.08～0.20Hzである。したがって、これらの変化を実測応答波形の

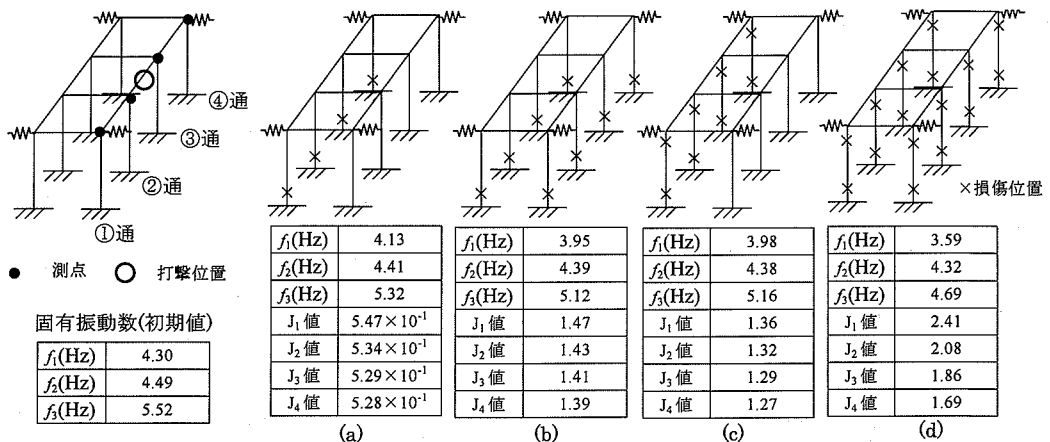


図-18 固有振動数とJ値 (一様損傷の場合)

フーリエ解析によって捉えるのは容易ではない。一方、J値は、一様損傷が柱下部のみの場合で、 $5.28 \times 10^{-1} \sim 5.47 \times 10^{-1}$ の範囲にあり、2箇所部位に一様損傷が発生した場合の(b)では、1.39~1.47程度の値となっている。

つぎに、一部の柱の損傷に対する重錘打撃応答特性を調べるため、重錘打撃側と反対側の柱のうち1本に損傷が発生した場合について検討した。損傷の程度は、前述の柱の端部が同時に損傷した場合と同じである。図-19に、損傷位置と1次~3次固有振動数及び損傷前後の応答波形を用いて計算したJ値を示す。この場合は、損傷箇所を1本の柱の下部1箇所に限定しているため、図-18の結果に比べて、固有振動数の変化が小さいことは容易に想像できることである。図-19から、不静定次数の高い立体ラーメン高架橋の柱部材の一部に損傷が発生

した場合における1次~3次の固有振動数の変化は、僅か1/100Hzオーダーの変化であることが分かる。これらの変化を実測応答波形のフーリエ解析等から求めるのは、精度的には不可能に近い。関ら<sup>12</sup>がラーメン高架橋の全体系1次固有振動数に加えて、柱の部分系2次固有振動数に注目しているのは、このことから有用であると思われる。一方、J値は損傷を与えた柱の位置により値が異なっており、最大で2倍程度の差異があることが分かる。

つぎに、立体ラーメン高架橋の柱の一部に損傷が発生した状態を見つけるための情報を得ることを目的に、重錘打撃位置と応答波形との関係性を調べるため、以下の検討を行った。

図-20は、③通り柱下部に損傷を与え、各柱の天端を順番に打撃し、打撃した柱の天端の測点位置で算出され

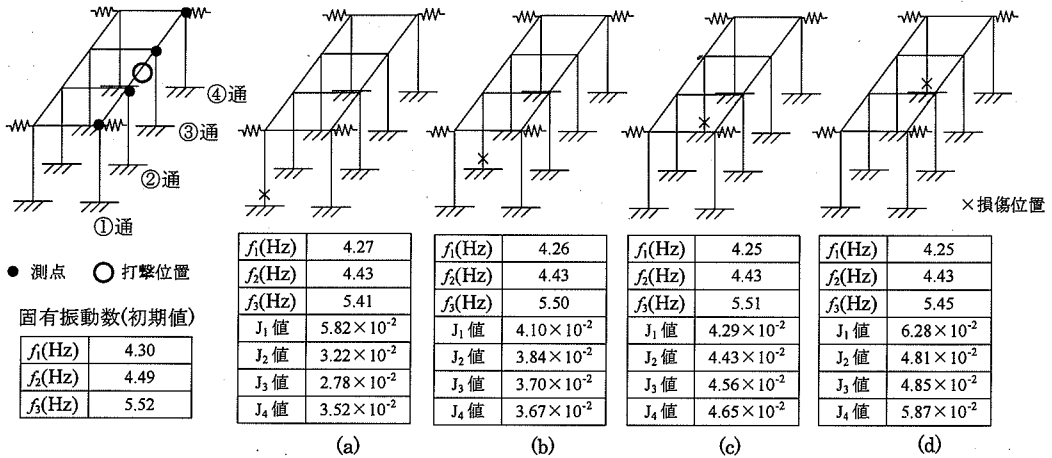


図-19 固有振動数とJ値 (1本柱損傷の場合)

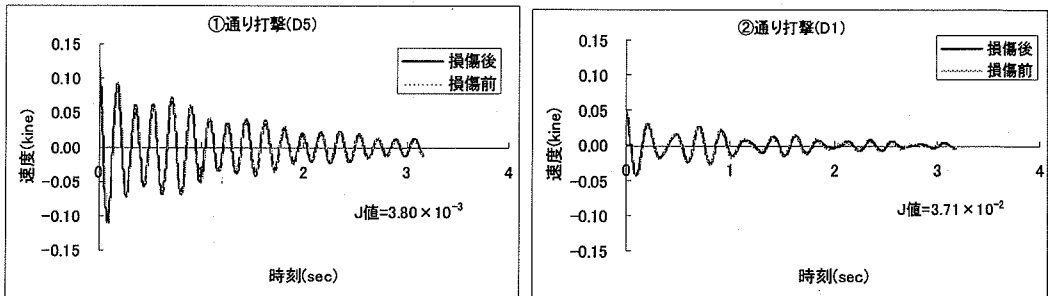
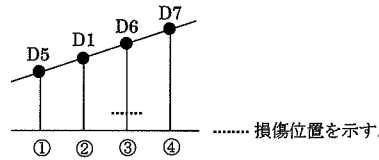
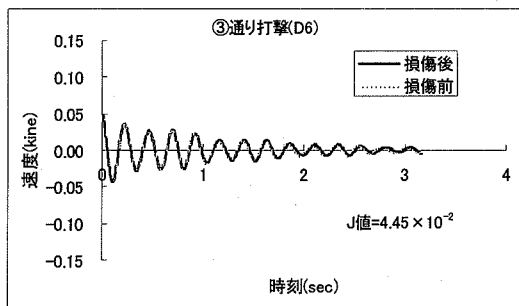


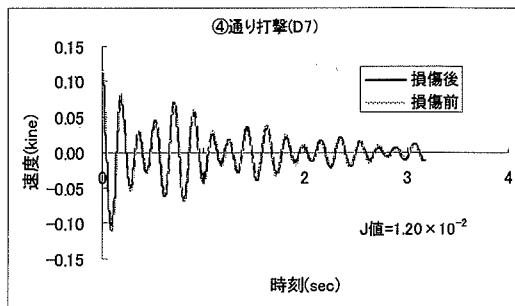
図-20 ③通り柱の損傷前後における重錘打撃応答波形の比較

る損傷前後の応答波形とJ値を示したものである。また、  
 図-21 は、各柱の天端を順番に打撃し、損傷を与えた③  
 通り柱の天端の測点において算出される損傷前後の応答  
 波形とJ値を示したものである。

図-20 から、③通り柱下部に損傷がある場合に、損傷  
 の前後で最もJ値が大きい値を示すのは、③通り柱を打  
 撃したときの③通り柱上部の応答波形(c)である。また、  
 図-21 から、③通り柱下部に損傷がある場合に、③通り

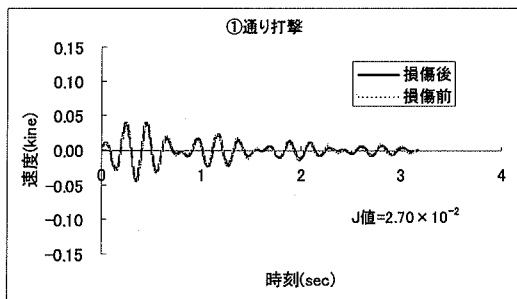
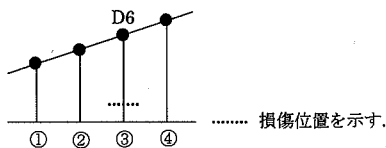


(c)③通り打撃波形(D6)

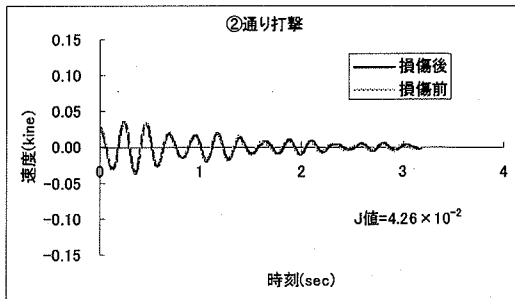


(d)④通り打撃波形(D7)

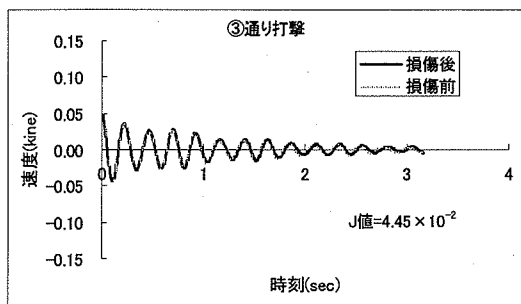
図-20 ③通り柱の損傷前後における重錘打撃応答波形の比較 (つづき)



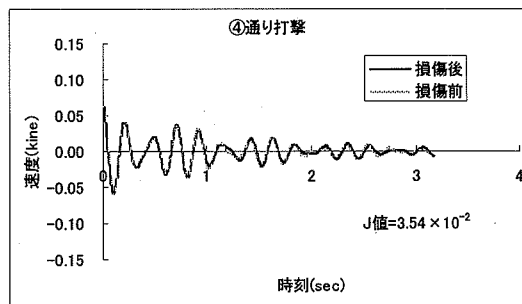
(a)①通り打撃波形



(b)②通り打撃波形



(c)③通り打撃波形



(d)④通り打撃波形

図-21 ③通り柱の損傷前後における重錘打撃応答波形の比較 (D6)

柱の天端の測点(D6)におけるJ値が最も大きい値を示すのは、③通り柱を打撃した場合であることが分かる。

以上の検討を踏まえて、立体ラーメン高架橋における一部の柱の損傷をJ値に基づいて検知する方法を以下に提案する。高架橋の各柱の天端に測点を設置し、各測点の応答波形について、健全な状態で予め測定しておいた応答波形(初期値)と健全性調査時の応答波形の間でJ値を計算する。何れかの測点のJ値に変化が現れれば、柱部材のどこかに損傷が発生していると考え、詳細な検査を実施する。また、損傷部材の位置を推定するためには、各通りの柱の天端を重錘で打撃し、打撃した位置に最も近い測点の応答波形についてJ値を計算する。このような手順により、各測点に対して計算されたJ値のうち最も大きな値を示した重錘打撃位置近傍の柱部材が損傷している可能性が高いものと判断する。

## 5. おわりに

本研究では、撤去予定の立体ラーメン高架橋を利用して、ウォール・ソーにより人工的に損傷を与える実験を実施し、損傷を与えた各段階で重錘打撃試験を実施した。

また、立体ラーメン高架橋を3次元立体骨組みにモデル化し、このモデルを用いて、重錘打撃試験で測定した重錘打撃力波形を加振力とする動的応答解析を実施した。この動的応答解析により計算した解析応答波形と重錘打撃試験により測定した測定応答波形を対比することにより、構造同定を行った。構造同定された3次元立体骨組みモデルを用いて、実験における各損傷段階の重錘打撃応答が精度良く表現できることが分かった。このような構造同定手法を適用することにより、立体ラーメン高架橋の損傷同定の可能性が明らかとなった。

つぎに、現場実験では高架橋撤去工事の工期、実験予算、安全管理上の問題等から今回の実験が実構造物を用いた人工損傷実験の限界であった。このため、実験結果に基づいて構造同定された3次元立体骨組みモデルを用いて、損傷の位置及び損傷箇所数が重錘打撃応答特性に与える影響について調べた。その結果、立体ラーメン高架橋の柱の一部に損傷が発生しているような場合には、1次固有振動数の変化は僅かであり、測定された応答波形に対するフーリエ解析によってその固有振動数の変化を捉えることは容易ではない。そこで本研究では、損傷前後の応答波形の変化を敏感に捉える指標としてJ値を導入することを試みた。その結果、立体ラーメン高架橋の各通りの柱天端に測点を設置し、各測点の測定波形と前回の測定波形を用いて計算されるJ値が何れかの測点で変化していれば、何らかの損傷が発生していることが

検知できる可能性が見出された。

また、損傷の発生している部材を推定する方法として、重錘打撃位置を変化させ、それぞれの打撃位置での測定応答波形を用いて、前回までに測定している同様の測定応答波形との間で計算するJ値が最も大きい重錘打撃位置近傍に損傷部材がある可能性が明らかとなった。

以上の結果から、立体ラーメン高架橋の健全性一次診断に重錘打撃試験を用いることの有効性が確認できた。今後は、多数の実構造物に本論文で提案した手法を適用し、構造同定及び損傷同定により得られる地盤ばね定数、部材の剛性等の信頼性を高めることやJ値に基づく損傷部材検知方法の有効性を検証することが重要であると考える。

## 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，土木学会，2001。
- 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，Vol3，No.8，pp.41-49，1989。
- 3) 岡林隆敏，原忠彦：道路橋振動特性測定における衝撃加振法の適用，構造工学論文集，Vol.34A，pp.731-738，1988。
- 4) 岡林雄樹：衝撃応答特性に道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ評価に関する一考察，土木学会第51回年次学術講演会，V-590，1996。
- 5) 西村昭彦：既設橋脚の固有振動数の標準値，日本鉄道施設協会誌，pp.507-510，1990。
- 6) 西村昭彦，羽矢洋：衝撃振動試験による健全度判定法，土木学会誌，pp.26-28，1993。
- 7) 江崎俊岳，日高巖，坂口寿章，甲斐総治郎，西村昭彦：衝撃振動試験による「増水期橋梁下部工」の安全性確認の一研究，土木学会第53回年次学術講演会，I-B451，1998。
- 8) 深石俊治，岩佐高吉，高橋郁夫，木村俊雄：レンガ構造物健全度評価法について，土木学会第51回年次学術講演会，V-606，1996。
- 9) 田中俊作，寄田悦夫，石井勝美：衝撃振動試験による被災構造物の安全確認について，土木学会第51回年次学術講演会，VI-52，1996。
- 10) 庄健介，平塚元康，北村泰寿：橋脚の健全度調査に用いる重錘打撃力の特性，神戸大学大学院自然科学研究科紀要，第19号-B，pp.129-140，2001。
- 11) 庄健介，北村泰寿，山本和宏，吉本博昭：橋脚一桁連成系の重錘打撃応答に関する一考察，建設工学研究所論文報告集，第42-A号，pp.169-179，2000。
- 12) 関雅樹，水谷健太，西村昭彦，中野聡：兵庫県南部地震によるラーメン高架橋の振動特性に関する考察，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.145-154，1996。

13) 淵本正樹, 田蔵 隆: 2次元有限要素法による地盤・杭・  
構造物系の地震応答解析における地盤の奥行き方向解析幅

に関する一考察, 清水建設研究報告, 第73号, pp.35-46,  
2000.

(2003. 2. 24 受付)

## DAMAGE DETECTION FOR RIGID FRAMED VIADUCT BY USING PERCUSSION TEST

Kensuke SHO, Hiroshi YAMAZAKI and Yasutoshi KITAMURA

The Percussion Test is one of soundness estimation methods in structural system. We carried out a field test on the old rigid framed viaduct, which was going to be pulled down. We gave artificial cracks to the viaduct by using concrete cutter and measured the vibration of viaduct by Percussion Test at every stage of artificial damage. On the other hand, we calculated impact response of viaduct by strike using 3D framed model. We estimated the degree of damage of viaduct by comparing measured vibration with numerical one.

We present the validity of Percussion Test for the damage detection of structure in this paper.