

# 振動データから橋脚の損傷を検知する方法

鈴木崇伸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail:tsuzuki@toyo.jp

本研究は振動データから橋脚の損傷を検知する方法を提案している。入力と応答をとらえることができる条件で計測された振動記録を用いて、剛性変化の分析結果をまとめている。橋脚の振動実験データと弾塑性応答解析結果を用いて塑性率により、損傷度が定量的に評価できることを示し、加速度計と傾斜計を組み合わせることにより、単点計測で橋脚の損傷検知が可能なことを示している。

**Key Words:** *detection of damage, vibration data, bridge column, non-linear dynamic analysis*

## 1. はじめに

大地震のときには多くの構造物が被害を受け、点検と復旧に時間がかかる。とりわけ社会基盤構造物は復旧・復興を左右する重要な構造物である場合が多く、迅速な点検作業が求められる。現場計測は実験室のように多くのセンサを配置することは困難であり、設置とメンテナンスの条件に照らして最小限のセンサが配置される。

また社会基盤構造物の劣化が問題になっており、平常時であっても経年により使用できなくなることが危惧されている。地震などの自然災害と経年劣化に対して構造物の健全性をモニタリングするニーズが高まっている。土木学会構造工学委員会ではこうしたニーズに対してセンシング技術の大枠を整理している<sup>1)</sup>。橋梁に限ってもいろいろなセンサや解析技術の適用が研究されており、意欲的に研究が進められている。

筆者らのグループも振動データから健全性評価あるいは損傷検知をする研究を進めてきている。鈴木他<sup>2)</sup>はジャイロの利用を検証しており、また変位出力が可能なセンサを目指して簡単な計算ロジックを提案している<sup>4)</sup>。鈴木を中心としたグループは建物を対象として地震観測を行い、健全性評価技術の検証を行っている。鈴木、松野<sup>5)</sup>は大変形実験前後の木造住宅の振動特性の変化を報告している。また本多他<sup>6)</sup>はRC建物の多点観測記録の分析から振動特性の変化を抽出する方法の提案をしている。2011年の東日本大震災を経て鈴木他<sup>7)</sup>は、震災前後の振動特性の変化を報告している。

今回の研究はこうした一連の研究で有望と考えられる損傷検知手法を橋梁に適用している。対象としたデータは

防災科学技術研究所によって行われたE-Defenceを用いた橋梁耐震実験であり、公開されたC1-1実験<sup>8)</sup>とC1-5実験<sup>9)</sup>のデータを用いている。基部と頂部に設置された加速度計のデータから損傷の有無を見分ける方法を検証している。また橋脚を2次元FEMによりモデル化し、損傷に至る動的解析を行う。橋脚天端に振動計があると仮定して振動データから損傷度を把握する手法を検討している。またコスト削減のために傾斜計を併用した計測の可能性についても検討を行い、橋脚の弱軸方向の傾斜データにより変位が推定できることを示している。

## 2. 振動データによる損傷検知の方法

著者らは建物を計測対象にして地震観測結果から構造物の健全度を測定する研究を進めてきている。建物の1階の加速度記録と建物上層階の加速度記録を用いて振動特性の変化を定量化する方法を提案している。ここでは2点の相対変位と上部の加速度からヒステリシスの分析を行う方法を適用する。

一般に構造物が損傷あるいは劣化すると剛性が低下して振動数が小さくなり、変位が大きくなる。ここで構造物に作用する外力である加速度と構造物の応答である変位が計測できる問題を考える。橋脚の場合、上部と下部の2点に加速度計があるケースである。

2点の加速度計が十分な精度で同期されていれば、相対変位の計算が行える。この相対変位を  $x$  軸に、絶対加速度の計測結果である上部の加速度を  $y$  軸にとって連続

プロットすると振動系のヒステリシス（外力と応答の時間変化）が得られる。水平加速度に質量をかければせん断力となり、また相対変位を2点の距離で割ればせん断ひずみとなることから構造系の復元力特性を表すグラフとなる。

ここで1自由度の振動方程式で加速度項をまとめると

$$n^2 u + 2h n \dot{u} = -(\ddot{u} + \ddot{u}_g) \quad (3)$$

となる。 $n$ は固有振動数、 $h$ は減衰定数である。左辺は減衰力と復元力の合計であり、右辺は慣性力である。減衰力と復元力は同時に大きくなることはなく、復元力が大きくなる変位の最大値付近では速度は小さくなり、逆に復元力が小さいときには速度による減衰力が支配的となる。振動現象では減衰力は復元力に比べて小さくなるため、慣性力と復元力の比例関係が基本となるが、減衰力が関係することによって楕円形の変化が生じる。楕円の大きさは振動系にはたらく力の大きさと変形を表している。楕円の長軸の傾きは固有振動数 $n$ の2乗となる。また楕円の短軸は減衰が大きいほど長くなる。減衰が0ならば楕円ではなく直線となる。加速度が大きい時には変位が応答し、加速度が小さい時には速度が応答することを視覚的に表わすことができる。

図-1に1自由度系に周期外力として加速度が作用するときの応答の模式図を楕円で近似して示している。楕円の大きさは振動形にはたらく力の大きさと変形を表している。楕円の長軸の傾きは固有角振動数 $n$ の2乗となる。また楕円の短軸は減衰が大きいほど長くなる。減衰が0ならば楕円ではなく直線となる。不規則波の場合には大きさの違う楕円がいくつも連なることになるが、1周期ごとに変化を追跡することで振動特性を評価することができる。

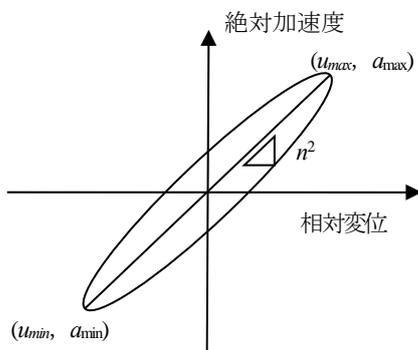


図-1 1自由度系の応答計算結果

### 3. 実験データの適用例

#### (1) 実験の概要

1995年の兵庫県南部地震による構造物の被害を受けて実大三次元的破壊実験装置(E-Defence)がつくられた。この世界最大最強の振動台に実大規模のRC橋脚を載せて加震により破壊させる実験が2007年から行われた。実験は大きく2つに区分され、C1実験は橋脚の破壊特性や耐震性能を明確にする実験であり、C2実験は桁・橋脚・支承・ジョイント・落橋防止構造等の全体系モデルを用いて橋梁の複雑な地震応答や破壊特性を明確にする実験である。

これらの実験の内、70年代に建設されたRC橋脚(基部曲げ破壊タイプ、段落とし無:C1-1)と現在建設されているRC橋脚(C1-5)のデータがASEBIにより公開されている<sup>10</sup>。実験の詳細は文献8)と9)に詳しく解説されているが、円形の6m高さの円柱橋脚の下部にフーチング、上部に桁受けを取り付けたRC構造であり、桁荷重を作用させた状態で加振実験を行っている。

入力地震動はJR鷹取の観測波形を0.8倍したものを100%として、30%と100%の加振を数回行っている。C1-1実験の100%入力のケースでは橋脚下部に損傷が発生し、円柱橋脚の破壊の様子が克明に記録されている。またC1-5実験では125%の条件でも実験が行われ、破壊に至るまでの複数回の実験が行われている。

大規模な実験であり、その結果についていろいろな研究者が分析を試みており、例えば川島他<sup>11)</sup>は2002年の道路橋示方書で設計された標準的な橋脚の性能の評価を行うとともに、設計技術の課題についても分析している。また永田他<sup>12)</sup>は損傷の進む橋脚の常時微動計測を行い、固有振動数から損傷を推定する方法を提案している。なお別の実験であるが小林他<sup>13)</sup>も道路橋の微動計測により振動数変化から損傷程度が推定できることを提案している。

#### (2) 使用するデータ

本研究ではフーチング上に置かれた加速度計(A-13~A-15)と橋脚頂部におかれた加速度計(A-25~A-27)の6成分を用いて波形分析法を試みる。加速度計の成分はA-13とA-25が橋軸直角方向(x方向とする)、A-14とA-26が橋軸方向(y方向とする)、A-15とA-27が上下方向(z方向とする)となっている。

計測データの例として表-1に橋脚に取り付けられた加速度計の最大値を示す。同表(a)は基部の最大加速度を示している。水平加速度で30%の実験は100Galから200Galの入力であり、100%の実験は600Galから1G程度の入力がなされている。それに対し頂部の応答は30%の実験が300Galから400Galであり、100%の実験では1Gから2G以上の応答となっている。基部が大きく破損した70年代仕様の橋脚の100%入力時に最大加速度が最も小さくなっている。

表-1に示した最大値は絶対加速度であり、構造物の質量を乗じると基部のせん断力と曲げモーメントが計算できる。損傷に関する一次情報として表-1(b)の数字だけを見ると現代仕様の橋脚の100%入力時に最も大きな断面力が

作用することになるが、この条件で小破程度であり、検知したいのは加速度の小さな70年代仕様である。加速度が大きい条件だけでは損傷検知ができないことになる。

表 - 1(a) 基部の記録の最大加速度(cm/s<sup>2</sup>)

種別		x 方向	y 方向	z 方向
70 年代	鷹取波 30%	157.5	172.2	70.2
	鷹取波 100%	600.5	863.7	309.7
現代	鷹取波 30%	135.5	90.6	63.8
	鷹取波 100%	779.3	940.4	543.2

表 - 1(b) 頂部の記録の最大加速度(cm/s<sup>2</sup>)

種別		x 方向	y 方向	z 方向
70 年代	鷹取波 30%	303.1	378.0	164.6
	鷹取波 100%	1055.9	974.6	877.4
現代	鷹取波 30%	322.4	272.8	135.9
	鷹取波 100%	2345.4	1361.7	1453.5

### (3) ヒステリシスの分析

次に振動データからヒステリシスを計算した結果を紹介する。橋脚頂部の加速度データは水平方向の慣性力に相当する。一方橋脚の応答は基部と頂部の相対変位となり、2点の加速度記録から相対変位波形を計算する必要がある。変位の計算には鈴木他<sup>4)</sup>によるデジタルフィルターの計算式を用いている。今回は200Hz サンプリングの加速度データであり積分計算は放物線積分とローカットフィルタを組み合わせた漸化フィルターを用いることとした。

$$y_0 = (q+1)y_1 - qy_2 + \frac{\Delta t}{12}(5x_0 + 3x_1 - 9x_2 + x_3) \quad (1)$$

$$q = \frac{\cos(2\pi f_0 \Delta t)}{1 + \sin(2\pi f_0 \Delta t)} \quad (2)$$

ここに  $x$  は入力、 $y$  は出力、添え字 0 は現時刻、添え字 1 は 1 ステップ前の時刻、添え字 2 は 2 ステップ前の時刻、添え字 3 は 3 ステップ前の時刻を表し、また  $q$  は 1 よりも小さな数値で、ゲインが 1/2 (-3[dB]) となる周波数  $f_0$  (Hz) から計算される係数である。後述する計算では  $f_0$  を 0.3[Hz] としている。上記のフィルターを 2 回適用すれば加速度の時系列を変位の時系列に変換できる。

図-2 は基部と頂部の相対変位を計算し、頂部の加速度の(-1)倍をしたデータと連続プロットを作成している。波形の乱れを取り除くために 0.5-4Hz のバンドパスフィルターをかけている。30%入力時には安定して楕円を描いているが、100%入力時には楕円が大きく乱れ、相対変位が大きいほど傾きが小さくなっている。この乱れは柱の損傷によると考えられる。

現代の設計仕様を再現した C1-5 実験のデータを使って同じ計算を行った結果が図-3 である。0.5-4Hz のバンドパ

スフィルターをかけた結果を示している。方向は図-2 とあわせて  $x$  方向としている。30%入力の結果は典型的な弾性応答であり、楕円の広がりも小さく、同じ方向に並んでいる。一方 100%入力の計算結果は楕円が広がり、また長軸の傾きもわずかに変わっている。

70年代仕様と現代仕様の比較をする。100%入力時に70年代仕様は大破となり、現代仕様は小波となっている。現代仕様の C1-5 実験では複数回の振動実験を行っているが、今回の解析では1回目の実験データを用いている。基本モードの振動成分を取り出してヒステリシスを描けば、形状の変化により損傷度合いが判読できる。

同期された基部と頂部の加速度記録から固有角振動数の2乗の傾きを長軸とした楕円ループを描くことができる。振動中に剛性の変化がなければ一定の傾きのままであるが、振動性状に変化があるときには楕円の傾きが変化し、楕円ループが複雑な形になることが確認された。また楕円ループを個別に取り出して長軸の傾きを計算すると固有振動数の変化を追跡できることを示した。

ここで提案した手法は2点の記録から損傷検知を行える方法である。しかしながら今回の計算は結果のわかっている震動実験の一例であり、グラフの形状変化や固有振動数の低下度合いに関し、事例収集をする必要がある。橋脚の損傷検知を確かなものにするためには、せん断破壊・曲げ破壊といった損傷モードと小破・中破・大破といった損傷程度の異なるデータを統計的に分析して損傷判定の閾値を決める必要がある。

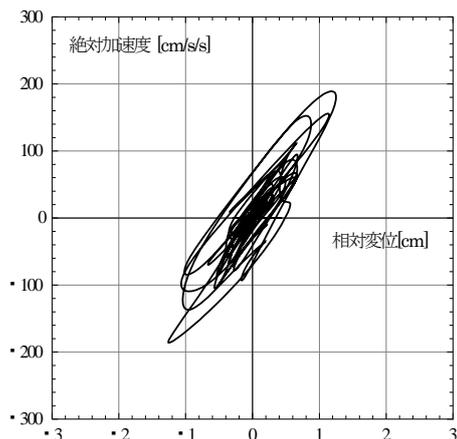
## 4. 損傷度の定量化

実物大実験から貴重なデータが得られるがケース数が限られてしまう。そこで設計で用いられる動的解析ソフトを利用して入力レベルを変化させた橋脚の動的解析を実行し、3章の方法と同様のヒステリシスの分析を行うこととする。

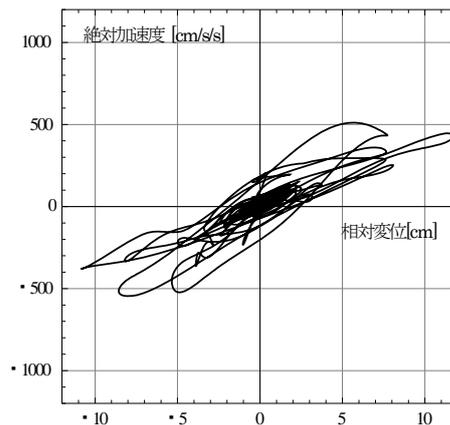
### (1) 解析の概要

基部から天端までの高さが7.7mの壁式RC橋脚を対象とする。壁厚は1mとし、鉄筋比を2%とやや小さめに設定する。使用ソフトはWCOMD Ver.2 (フォーラムエイト社製)としてコンクリートや鉄筋の強度や剛性は標準的な値を用いて解析を行う。今回の解析は平面ひずみ条件の解析であり、橋桁部を省略する。そのため弾性応答時の固有周期が0.4秒程度になるように天端幅部を弾性要素とし、この部分の単位重量を大きく設定し、調整することとした。図-4にモデル図と諸元を示すが、図中の橋脚頂部に置いた□の部分の振動データを取り出して観測波形とする。

入力地震動は1.5秒以下でおよそ一定の加速度応答となる波形の振幅を定数倍して変化させる。入力加速度は180Galから580Galとしている。図-2に入力地震動の加速

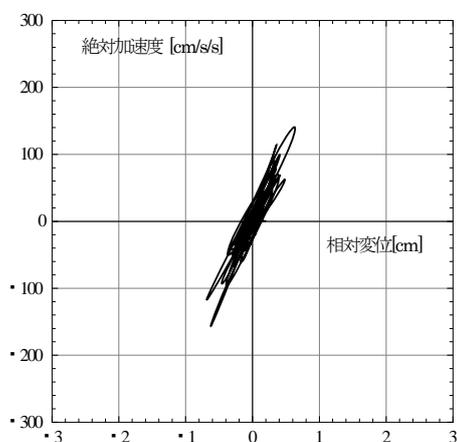


(a)30%入力時のヒステリシス

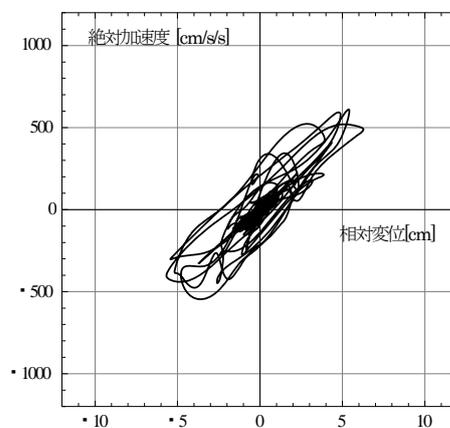


(b) 100%入力時のヒステリシス

図-2 C1-1 実験の1次モードのヒステリシスの計算結果 (x 軸)



(a)30%入力時のヒステリシス

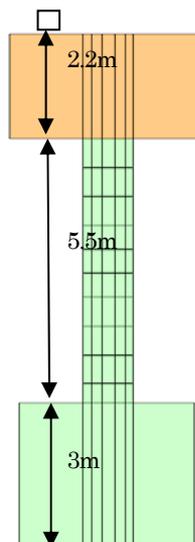


(b) 100%入力時のヒステリシス

図-3 C1-5 実験の1次モードのヒステリシスの計算結果 (x 軸)

度応答スペクトル ( $h=0.1$ ) を示す。損傷無しの場合-A は約 300Gal, Case-B は約 600Gal, Case-C は約 800Gal, Case-D は約 1000Gal の弾性応答が見込まれる。各ケースについて動的非線形解析を行うが、Case-A の振幅を 1/5 倍した小地震のデータを強震波形の前後に付け加えて損傷前後の中小地震による応答も計算することとする。損傷前の計算は入力レベルによらず同じ計算となる。損傷後の計算はプログラムで記憶されている剛性低下の状態での弾性嘔吐がどのようになるかを確認する。

解析終了後に波形を 3 分割して、データ整理を行う。入力レベルの A,B,C,D に添え字を追加し、1 は約 40Gal を入力した応答、2 は大地震の応答、3 は大地震後に約 40Gal の入力に対する応答とする。



項目	数値
(コンクリート)	
単位堆積重量	23kN/m <sup>3</sup>
ヤング率	20kN/mm <sup>2</sup>
圧縮強度	21N/mm <sup>2</sup>
引張り強度	1.8N/mm <sup>2</sup>
最大圧縮ひずみ	0.205%
(鉄筋)	
単位堆積重量	77kN/m <sup>3</sup>
ヤング率	200kN/mm <sup>2</sup>
降伏強度	350N/mm <sup>2</sup>
鉄筋比	2%
(弾性要素)	
単位堆積重量	65kN/m <sup>3</sup>
ヤング率	200kN/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.3

図-4 橋脚の解析モデル

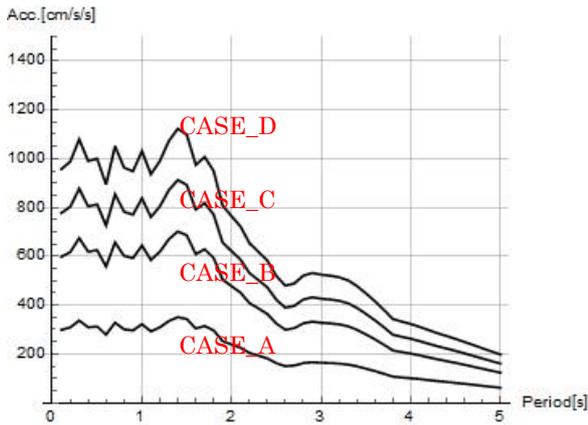


図-5 入力地震動の特性 ( $h=0.1$ )

## (2) 解析結果

強震解析の概略結果を表-2に示す。弾性応答の場合には300Galから1000Galの加速度応答を見込んでいたが、鉄筋とコンクリートの塑性変形が起きるために、応答加速度は頭打ちとなり、変位が大きく現れている。また卓越振動数もCase-Aでは2.2Hzであったが、入力レベルが上がるにつれて徐々に小さくなっている。Case-Dでは0.87Hzにまで低下している。図-6に部位ごとの損傷程度を色表示した例を示す。要素の引張りひずみが0.1%以上を黄色、要素の圧縮ひずみが0.3%以上を赤色としている。Case-Aは損傷レベルに達していないため省略している。Case-Bでは鉄筋が降伏するひずみレベルであり、Case-CとCase-Dでは橋脚基部のコンクリートが圧壊するひずみレベルとなっている。

3章で示したヒステリシスを用いて解析結果を整理したのが図-7である。注目する点の絶対加速度と相対変位の時系列データを取り出し、加速度を(-1)倍して連続プロットしている。Case-Aは弾性応答であり、減衰も小さいグラフとなっている。Case-Bは小破、Case-Cは中破、Case-Dは大破の結果となっている。入力レベルが上がるにつれて、応答加速度が頭打ちになり、相対変位が大きくなって横に広がった図形になるのが確認できる。解析結果であるので要素の剛性低下を平均的に求めた図形となっているが、振動特性の変化から損傷程度を評価できることを示している。なお解析では実験で見られた高周波のノイズは見られなかったためバンドパスフィルター処理は行っていない。

表-3に弱震時の解析結果を整理している。入力は36Galで一定であるが、強震の解析後では剛性の低下が記憶されているために、振動数の低下した解析結果となっている。振動数は表-2に比べてやや回復した結果となっており、振動数の変化に応じて変位が大きくなる弾性応答となっている。

## (3) 塑性率による判定

図-7ではループの拡がりに差異があるのが確認できるが、これらの図形から塑性率を計算する。塑性率は鉄筋コンク

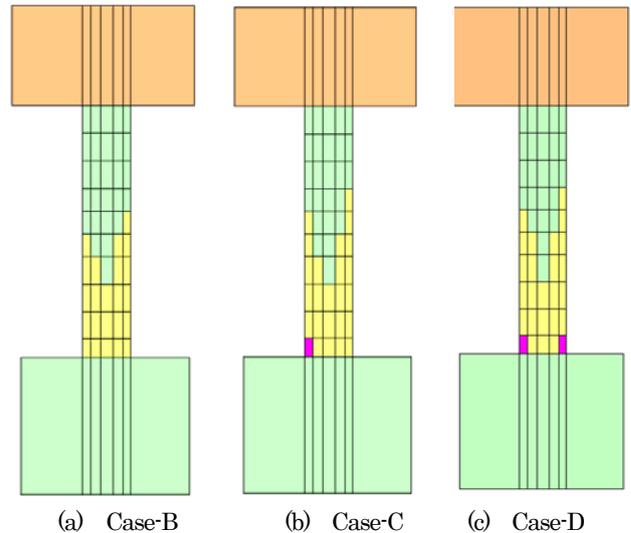


図-6 動的解析による損傷状態

表-2 強震解析の結果

項目	A-2	B-2	C-2	D-2
入力加速度 [Gal]	181	363	471	580
最大加速度 [Gal]	328	631	655	675
最大変位 [cm]	1.84	11.6	14.8	18.8
卓越振動数 [Hz]	2.20	1.26	0.99	0.87

表-3 弱震時の結果

項目	A-1	A-3	B-3	C-3	D-3
入力加速度 [Gal]	36	36	36	36	36
最大加速度 [Gal]	171	112	174	182	190
最大変位 [cm]	0.64	0.48	2.00	2.36	2.68
卓越振動数 [Hz]	2.65	2.51	1.47	1.43	1.35

リートの靱性を評価する尺度であり、通常は設計計算において用いられている。観測データから塑性率を求めることにより、設計データと対比が容易な尺度とすることができる。

図-8に塑性率の概念図を示すが、横力 $Q$ に対して塑性化して完全降伏する構造があるとき、塑性率 $\mu=\delta_{max}/\delta_y$ により定義される。ここに $\delta_{max}$ は最大変位、 $\delta_y$ は降伏変位である。図-7に示したヒステリシスを絶対値に変換して再描画して、グラフから読み取った結果を表-4に示す。塑性率に換算しておよそ2~5の応答であったことがわかり、塑性率3程度までは小破、塑性率4程度で中破、塑性率5以上で大破となる構造であったことが判明した。振動データから塑性率を計算することにより損傷度の尺度とすることができる。ただし今回は目視で降伏点を決めたが、振動データから降伏点を決定するロジックを作る必要がある。

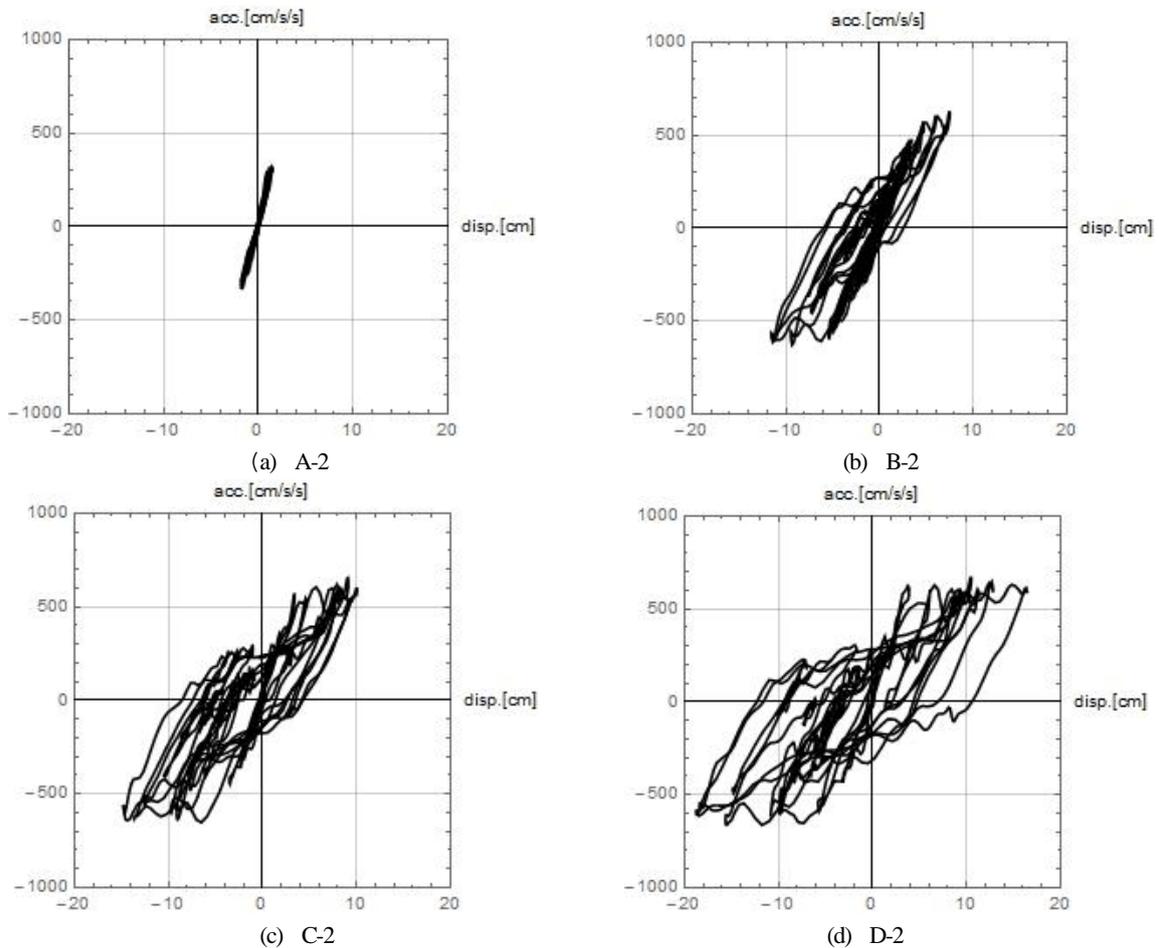


図-7 各ケースで得られたヒステリシス

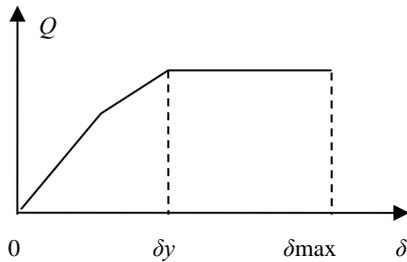


図-8 塑性率の概念図

表-4 塑性率の判定結果

項目	B-2	C-2	D-2
降伏変位 $\delta y$ [cm]	4.5	3.5	3.7
最大変位 $\delta max$ [cm]	11.6	14.8	18.8
塑性率 $\mu$	2.6	4.2	5.1

#### (4) 傾斜計測による相対変位の推定

構造解析では固定点の変位を0とした計算結果が得られる。一方振動計測データでは固定点は無く、対比点を設定して相対変位を計算しなくてはならない。同期した2点の計測は高価なものとなる。そこで相対変位を別の計測量から推定する方法を考える。今回の橋脚モデルは底部を固

定した片持ちばりであり、天端のたわみとたわみ角は比例関係にある。そこで加速度計と傾斜計を組み合わせることにより、1点の観測データから入力と応答が計算できないか検討する。

橋脚天端の注目点近傍の2節点の上下方向変位から傾斜角を計算できる。計算された傾斜角と相対変位は損傷が進行してもよい比例関係となる。図-9に傾斜角と変位のプロットを示している。よい比例関係となった一例としてCase-Cを同図(a)に示している。表-5に弱震時の傾斜角と変位の関係を整理している。また表-6に損傷時の比例関係を整理している。無被害から中破までは最大変位と最大傾斜角の比例係数は600~700cm/radとなり、およそ基部から拡幅部の重心距離となっている。

一方大破となったCase-Dでは塑性化部分が拡大するために比例係数が小さくなる。このときの傾斜角と変位のプロット図を図-9(b)に示している。傾斜運動と相対変位の間に位相差が生じており、また楕円の長軸も傾きを変えている。表-6の比例係数は楕円の傾きの平均値を示している。

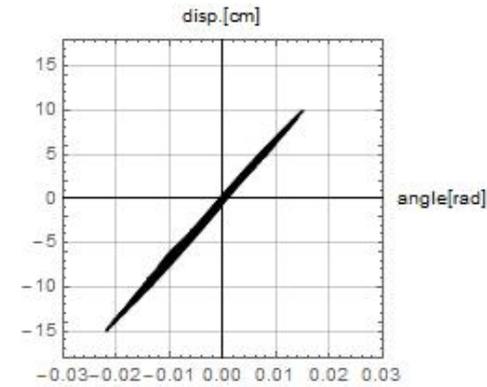
以上の解析結果の分析より、傾斜角と相対変位が比例する特性を用いて相対変位を推定できることが明らかになった。ただし損傷が大きいときには比例係数が小さくなる点に注意する必要がある。

表-5 変位と傾斜角の比例関係

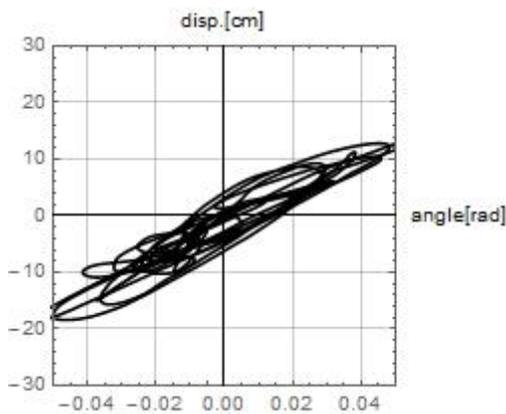
項目	A-1	A-2	A-3
最大変位[cm]	0.64	1.84	0.48
最大傾斜角[mrad]	1.12	3.02	0.80
比例係数[cm/rad]	565	608	598

表-6 変位と傾斜角の比例関係

項目	A-2	B-2	C-2	D-2
最大変位[cm]	1.84	11.6	14.8	18.8
最大傾斜角[mrad]	3.02	17.4	21.8	70.8
比例係数[cm/rad]	608	655	682	306



(a) C-2 (中破)

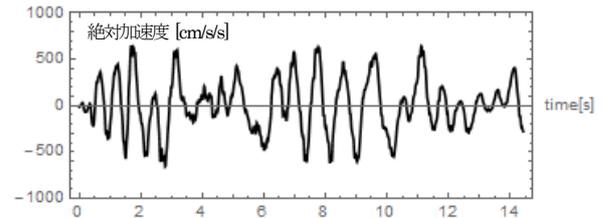


(b) D-2 (大破)

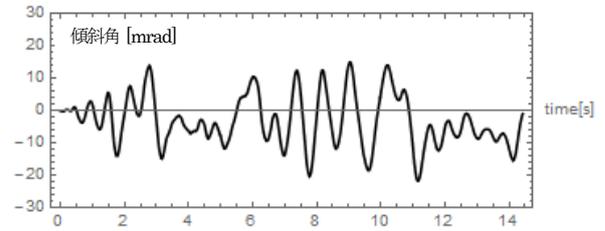
図-9 傾斜角と相対変位の分析図

### (5) 傾斜計測による損傷判定例

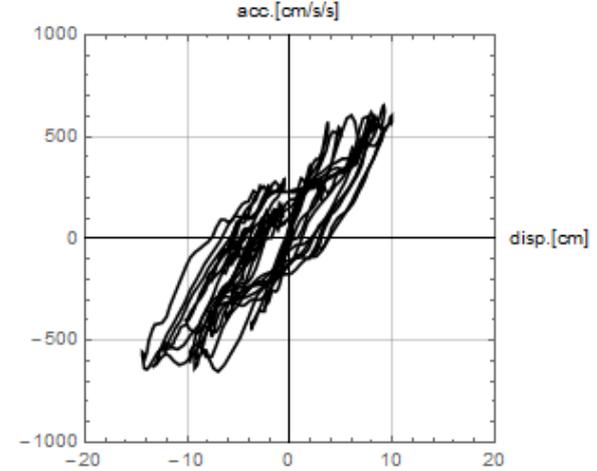
解析結果により中破程度までは傾斜角と相対変位が比例することが確認されたが、橋脚天端のデータのみを用いて損傷判定計算を行ってみる。図-10(a)は橋脚上の加速度データであり、入力地震動は不明とする。また同図(b)は橋脚上の傾斜角データである。解析結果を踏まえ拡幅部の重心距離である660cm/radを比例係数としてヒステリシスを描いたのが同図(c)である。解析時の比例係数よりも小さく設定しているが、同じ形状になることが確認できる。塑性率の判定も可能であり、変位の比率計算をすることにより、比例係数が消去されることになる。



(a) 橋脚上の加速度記録



(b) 橋脚上の傾斜記録



(c) 傾斜角から推定した変位を使ったヒステリシス

図-10 傾斜角と加速を用いた損傷評価計算例 (Case-C)

## 5. まとめ

本研究は振動データから橋梁の損傷の有無を見分ける方法を提案している。観測データが多いほどモード形の変化など詳細な分析が可能となるが、最小限の観測を前提とする。基本モードの入力と出力が判別できる2か所にセンサを置く。2点が同期されていれば相対変位が計算でき、相対変位と観測された応答加速度を組み合わせることにより、ヒステリシスループを描くことができる。この楕円ループの長軸の傾きは基本モードの固有角振動数の2乗に相当する。損傷が大きいときには楕円が広がりや傾きが変わることから損傷度判定に利用することができる。

本研究は公開された実験データを用いてヒステリシスの計算結果を示し有効性を確認している。さらに設計用の動的解析プログラムを用いて、解析的損傷状態を再現して損傷度の閾値の検討を行った。入力レベルを変化させて小破、中破、大破の振動データを作成した。実験と同様の

解析を行い、ヒステリシスから塑性率の計算を行えば損傷程度の尺度とできることを示した。

橋脚の相対変位の計算には上下2点の振動データが必要となるが、同期計測は困難なことが多い。そこで橋脚上部に傾斜計を置き、相対変位を推定する方法を解析データから検証した。弱震時から中破までは比例係数が凡そ一定になることを確認し、橋脚上部のみの観測で損傷度判定を行える可能性を示している。

今後、橋梁の解析モデルを追加するとともに、単点での計測により安価かつ効率的に損傷度を判定する方法の研究を進める予定である。

## 謝辞

本研究では防災科学技術研究所「ASEBI」より課題名「E-Defence を用いた橋梁耐震実験研究」の公開データを使用しました。実験関係者に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会センシングと情報社会基盤研究小委員会:センシング情報社会基盤, 丸善出版, 2015.3.
- 2) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 壁谷澤寿海: ジャイロセンサーによる構造物の耐震性能モニタリング, 土木学会応用力学論文集 Vol.6, pp.747-754, 2003.8.
- 3) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 壁谷澤寿海: ジャイロセンサを用いた地震観測の有効性に関する考察, 土木学会応用力学論文集 No.9, pp.701-708, 2006.8.
- 4) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 古川洋之: デジタルフィルタによる変位計算と精度の検証, 土木学会応用力学論文集 No.10, pp.631-638, 2007.8.
- 5) 鈴木崇伸, 松野浩一: 中小地震観測データを用いた住

宅の振動特性評価, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.55B, pp.559-568, 2009.3.

- 6) 本多弘明, 堀宗朗, 鈴木崇伸, 古川洋之: 同期された加速度計を使った実構造物の復元力特性の計算手法の開発, 土木学会応用力学論文集 No.11, 2008.8.
- 7) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 古川洋之: 高品質な振動計測システムの開発と RC ビルの揺れ特性の分析, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.59B, pp.409-416, 2013.3.
- 8) 防災科学技術研究所: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-1 橋脚) 震動破壊実験研究報告書, 防災科学技術研究所資料第 331 号, 2009.1.
- 9) 防災科学技術研究所: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書, 防災科学技術研究所資料第 369 号, 2012.10.
- 10) 防災科学技術研究所「ASEBI」より課題名「E-Defence を用いた橋梁耐震実験研究」(<https://www.edgrid.jp/datas>, 2015.3.16 閲覧).
- 11) 川島一彦, 佐々木智大, 右近大道, 梶原浩一, 運上茂樹, 塚淳一, 幸左賢二, 高橋良和, 矢部正明, 松崎裕: 現在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する実大震動台実験及びその解析, 土木学会論文集 A Vol.66No.2, 324-343, 2010.6.
- 12) 永田聖二, 金澤健司, 梶原浩一, 矢花修一: 常時微動モニタリングに基づく実大 RC 橋脚試験体の地震損傷評価, 土木学会構造工学論文集 Vol.56A, pp.49-59, 2010.3.
- 13) 小林 寛・運上茂樹・加納 匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集, 2005.

(2016.9)