

地震時のRC橋脚の1次スクリーニングを目的とした 加速度波形からのリアルタイム損傷検知

水谷司¹・肥田隆宏²

¹正会員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656東京都文京区本郷7丁目）

²正会員 修(工) 日揮株式会社 ENテクノロジーセンター（〒220-6001横浜市西区みなとみらい）

1. 研究背景と目的

地震発生後には橋梁や建築物など社会基盤構造物の被害状況の早期判断が求められる。現在は目視やポータブル検査機器を使用した人手による検査が主に行われているが、地震発生後にすべての構造物を点検するには多くの時間と労力を要してしまう。そのため、これまでリアルタイムに構造物の状態を把握するために様々なシステムが研究・開発されてきた¹⁾。たとえば、光ファイバーを桁に密に設置しローカルなひずみを計測することで状態変化を把握できる^{2), 3)}。また、アコースティックエミッション（AE）の技術では構造物が変形や損傷する際に放出される高周波の弾性波を計測することで損傷を検知できる⁴⁾。しかし、これらのシステムは、センサ設置やコストの問題から幅広い展開が困難なものが多かった。

これに対し加速度計は比較的安価であり設置も容易である。また、近年開発が急速に進んでいる無線センサシステム^{5), 6)}によって加速度センサノードを広域に分散しておくことも将来可能となることが期待される。ただし、日本国内だけでも膨大な数のインフラがあることを考えると、たとえば1つの橋脚に多数の加速度センサを密に設置することはコストなどの面から現実的ではなく、実務上それぞれの橋脚にせいぜい1つないし2つの少数個のみ設置することが限界であると考えられる。

また、加速度データが得られたとしても、それにより構造物の状態変化をリアルタイムで検知する手法はいまだ開発段階であり確立されたとはいえない状況にある。加速度を用いた損傷検知の方法としては固有振動数の変化を評価するものももっとも単純で一般的であるが⁷⁾、地震後に多くの構造物に対し

てインパクト試験を実施し固有振動数を推定することは困難であり、また実施できたとしてもリアルタイム性に乏しい。また既往研究で10 kHzなどの通常の地震観測のサンプリング周波数よりも高周波で構造物の加速度応答をサンプリングすることで、クラックの発生などに起因する高周波の衝撃波を捉えられる可能性も示唆されているが^{8), 9)}、既存のインフラに設置されたセンサを考えるとサンプリング周波数は数100 Hzが現実的であるといえる。

したがって、数100 Hzで計測した少数個の加速度センサのデータのみから、インフラの損傷の有無をリアルタイムに判断できる技術があれば、実務上有効と考えられる。また、大規模な地震が発生すると手当たり次第に構造物を点検する必要がある現状を鑑みると、もし損傷の有無の「あたり」だけでも付けられれば、点検すべき構造物の1次スクリーニングに利用することができるため工学的には価値があるといえる。

そのような背景のもと著者らのグループでは、特にRC橋脚を対象に、橋脚上の1箇所のみ加速度計を設置し、数100 Hzのサンプリング周波数で観測された地震時の加速度応答から信号処理により損傷を検知することを試みている。この方法では、数100 Hzの加速度波形に発生する衝撃に由来すると考えられるわずかな特異的な変化、すなわち特異点を連続ウェーブレット変換により検知することを試みている^{8), 9)}。これはウェーブレットスペクトルが時間周波数平面で特異点において低スケール（高周波側）を頂点として高スケール（低周波側）に広がる影響円錐とよばれる三角形の反応を示す性質を利用し、その反応から損傷の有無を判定するものである。しかし、実際の計測データは損傷が発生した瞬間以外の波形部分のスペクトルに影響を受け損傷時の影響

円錐が乱れるため判定が困難であったことや、また影響円錐がみられたとしてもそれが定量的な指標ではないため扱いが難しいといった問題があった。

そこで、本研究では加速度波形の各時刻における Lipschitz-Hölder 指数（特異点の性質を特徴づける指数）を定量的に評価する手法を RC 橋脚 - 地盤基礎一体モデルの振動台破壊実験データに適用することで、損傷時と非損傷時の特異性の違いから損傷を検定できることを実験的に示すことを目的とした。

2 章ではまず特異点と Lipschitz-Hölder 指数との関係について既往研究の成果から本研究に関わる部分について述べた上で、波形の Lipschitz-Hölder 指数を機械的に推定できるウェーブレット変換を使った方法について説明する。3 章では、2 章で述べた理論に基づき RC 橋脚 - 地盤基礎一体モデルの大規模振動台破壊実験データに連続ウェーブレット変換を適用し、従来の影響円錐による損傷発生の有無の判定の限界について調べた上で、新しく提案する定量的な指標である波形の Lipschitz-Hölder 指数の時間変化から損傷発生の有無を判定できるかについて考察する。4 章で本論文の結論を述べ、最後に 5 章で今後の展望について述べる。

2. Lipschitz-Hölder 指数の意味とその推定

(1) 特異点および Lipschitz-Hölder 指数の定義

関数を n 回微分することで出てくる不連続点のことを n 次の特異点という。関数 $f(x)$ の x_0 点周りのテイラー展開の 0 から n 番目までの項の和を $p_n(x - x_0)$ とすれば、それは

$$p_n(x - x_0) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k \quad (1)$$

と表される¹⁰⁾。ここで、 $f^{(k)}(x)$ は $f(x)$ の k 階微分を表す。 x_0 において $f(x)$ が無限回微分可能であれば、式(1)の多項式は無限項まで計算することができ、その無限和 $p_\infty(x - x_0)$ は以下に示すように $f(x)$ に収束する。

$$f(x) = p_\infty(x - x_0) \quad (2)$$

一方、 x_0 において $n + 1$ 回以上微分可能でないときには、式(1)の多項式は $k = n$ までしか計算できないため、 $f(x)$ を $p_n(x - x_0)$ を使って表すと、以下に示すように誤差 ε が生じる。

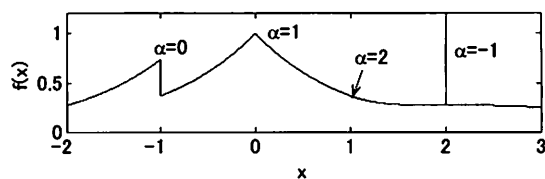


図-1 $x = -1, 0, 1, 2$ において特異点を有する関数の例。それぞれの Lipschitz-Hölder 指数は $\alpha = 0, 1, 2, -1$ である。

$$f(x) = p_n(x - x_0) + \varepsilon \quad (3)$$

この誤差 ε の大きさと $|x - x_0|$ との間には、

$$|\varepsilon| \leq C|x - x_0|^\alpha \quad (C : 0 \text{ 以上の実数}) \quad (4)$$

の関係が成立し、 $n \leq \alpha \leq n + 1$ を満たす実数 α が存在する¹⁰⁾⁻¹³⁾。この α が本研究で着目している特異点の性質を定量的に表わす Lipschitz-Hölder 指数と定義される¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。

Lipschitz-Hölder 指数は特異点のタイプに応じて変わるため、特異点の性質を特徴づける指標となる。関数各点で特異点のタイプが異なれば α も点ごとに異なる値をもつ。

図-1 に特異点をもつ波形の例¹³⁾を示しており、これは $x = -1, 0, 1, 2$ の 4 点において特異点をもつ。図-1 から直観的にこれら 4 点の特異点のタイプは異なっているようにみえる。それぞれの点での解析的に求められる Lipschitz-Hölder 指数の理論値は $\alpha = 0, 1, 2, -1$ であり¹³⁾、それぞれ異なる値をもっていることから確かに特異点のタイプは異なっていることがわかる。

一般的には Lipschitz-Hölder 指数は整数にはならず、たとえば $\alpha = 0.5$ の特異点の場合には、図-1 に示すように $x = -1$ に示すステップ関数的な変化と $x = 0$ に示す尖った点との中間のような変化をする点であることを意味する。

(2) ウェーブレット変換による Lipschitz-Hölder 指数の推定

図-1 に示した波形は解析的な波形であり、厳密にそれぞれの特異点における Lipschitz-Hölder 指数を推定することが可能である。しかし、実際の計測波形にはノイズなどの確率的成分が含まれており、解析的に信号各点での Lipschitz-Hölder 指数を推定することは容易でない。そのような複雑な波形の Lipschitz-Hölder 指数についても機械的に推定できる方法にウェーブレット変換を使った方法がある。詳

細は他の文献¹⁰⁾⁻¹⁶⁾に任せて割愛するが、検出できる特異点の種類はウェーブレットに依存する。ウェーブレットには、以下の式で示す消失モーメントという性質を定義することができる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^m \overline{\psi(x)} dx = 0 \quad (0 \leq m < N) \quad (5)$$

ウェーブレットが式(5)を満たすとき、 N 次消失モーメントをもつという¹¹⁾。今、 $n < N$ として、式(3)で示した n 回微分可能、 $n + 1$ 回以上微分不可能な関数 $f(x) = p_n(x - x_0) + \varepsilon$ を考える。この $f(x)$ の連続ウェーブレット変換は、式(5)の性質から n 次までの多項式成分がゼロとなるため、結局、

$$\begin{aligned} W_{\psi}[f](b, a) &= W_{\psi}[p_n(x - x_0) + \varepsilon](b, a) \\ &= W_{\psi}[\varepsilon](b, a) \end{aligned} \quad (6)$$

となることがわかる。

つまり、 $p_n(x - x_0)$ の微分可能な成分が消え、微分不可能な特異点の情報を含む ε 部分のみを抽出できる。したがって、 n より大きい次数の消失モーメントをもつウェーブレットを使うことにより、 n 階以上の導関数が不連続になる n 次の特異点を検出できることがわかる。逆に、 n より小さい次数の消失モーメントをもつウェーブレットでは n 次の特異点は一般的には検出できない。たとえば、次章以降の解析で用いるウェーブレットである Daubechies ($N = 5$) ウェーブレット¹³⁾は、5 次の消失モーメントを有するため、5 回微分してはじめて不連続になる特異点までも検出することが可能である。つまり、5 次以下の特異点の発生している時間においてウェーブレットスペクトル上に影響円錐が現れる。

以上のことから、波形のもつ最大の特異点の次数の見当を事前につけることができれば、それ以上の次数の消失モーメントもつウェーブレットを使って連続ウェーブレット変換することで波形内の特異点を漏れなく検出できる。さらに、このウェーブレット変換の結果からいわゆる WTMM 法^{11), 12)}よばれる手法を使って Lipschitz-Hölder 指数を機械的に推定することが可能である。

3. 実験データの Lipschitz-Hölder 指数の推定とそれによる損傷検知の可能性の検証

連続ウェーブレット変換を用いた特異点の検出および分析方法を、京都大学社会基盤工学専攻の高橋

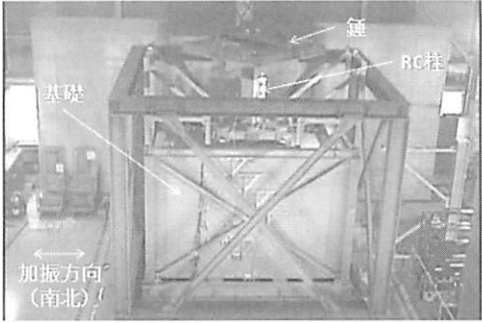


図-2 縮小 RC 柱-地盤基礎振動破壊実験(全景)

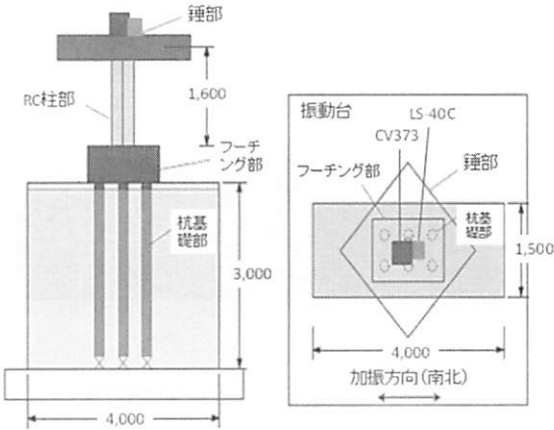


図-3 鉛直面イメージ(左), 水平面イメージ(右)



図-4 錘上部に設置した加速度計設置状況 (CV373, LS-40C のサンプリング周波数はそれぞれ 200 Hz と 10 kHz である)

良和准教授らが過去実施した大林技術研究所の振動台を用いた RC 橋脚-地盤基礎一体モデルの大規模振動破壊実験¹⁷⁾の RC 橋脚天端の加速度応答波形に適用し、その有効性の検証を行った。RC 橋脚天端の加速度応答は、著者らが設置した加速度センサにより計測した。

(1) 縮小 RC 橋脚-地盤基礎一体モデル振動台実験の概要

本実験は図-2、図-3 に示すように縮小 RC 柱と地盤基礎を含めた振動破壊実験で、構造物と地盤の

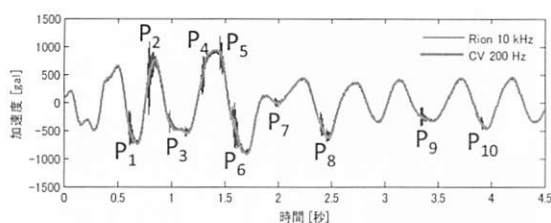


図-5 Rion 10 kHz と CV 200 Hz データの比較

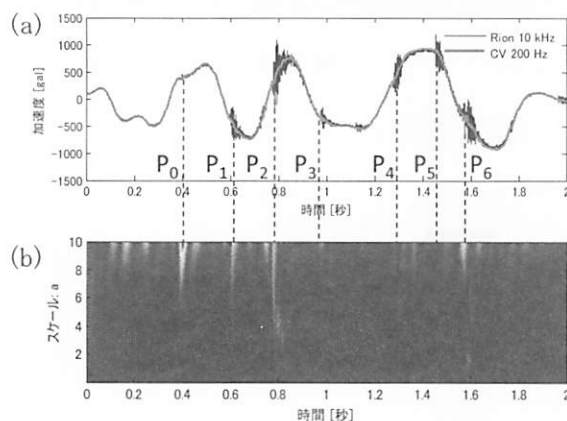


図-6 (a) : 図-5 の 0 秒～2 秒までの拡大, (b) : 200 Hz サンプルング加速度データの連続ウェーブレット変換 (ウェーブレットには, Daubechies ($N = 5$) ウェーブレットを用いた).

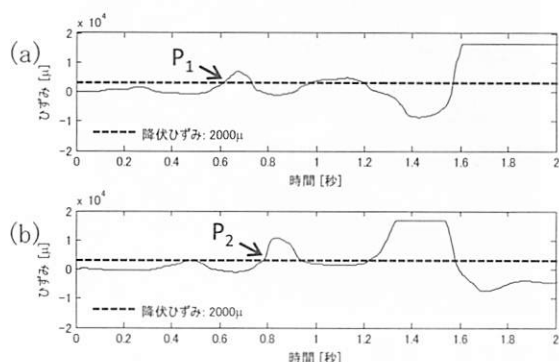


図-7 RC 柱基部のビデオ映像 ((a) : 0 秒における損傷がないと考えられる状態, (b) P_3 : 微細なクラックの発生 (映像の解像度の問題でクラックの位置がわかりにくいので, クラックに沿って赤線を引いている), (c) P_4 : クラックの発生, (d) P_6 : コンクリートの剥落が発生)

動的相互作用を考慮した現実に近いモデルでその動特性を検証することを目的としている。ただし、この実験モデルでは実構造物において RC 橋脚上に設置される桁を模擬した錘を橋脚モデルの上に設置し橋脚と剛結している。そのため、実橋梁で発生する橋脚と桁間の連成などの動的相互作用の影響はこの

橋脚モデル上の加速度に生じない。

RC 柱は一辺 320 mm の正方形断面であり、RC 柱基部から高さ 1,600 mm の位置に 10.1 ton の鋼製の錘が固定されている。RC 柱は高橋らが E-ディフェンスで行った実験¹⁸⁾と同様の設計であり、主鉄筋は D10 が 16 本、帯鉄筋は D4 が 40 mm 間隔で配置されている。RC 柱の損傷が杭基礎部材の損傷に先行するように設計されている。四隅の主鉄筋にはひずみセンサが設置されている。錘と土層上部の相対変位も計測されている。また、ビデオカメラにより RC 柱基部付近のコンクリートの損傷状況の記録も行われている。

加振条件は E-ディフェンスでの実験で応答が最大となった北西方向の水平 1 方向加振であり、振動台制御波は構造物のスケールに合わせて相似則によって調整している。兵庫県南部地震時に、JR 鷹取駅で観測された加速度波形 (以下、JR 鷹取波という) に倍率を掛けて段階的に増幅して入力し、複数の加振実験を実施している。今回分析したのは、はじめて RC 橋脚に損傷が確認された増幅倍率 1 倍のオリジナルの JR 鷹取波 (最大加速度 616 gal) の加振ケースである。

錘上部に図-4 のように 2 台の加速度センサ (東京測振社製 CV373 (測定範囲 : $\pm 2,000$ gal, 仕様上の分解能 : 0.03 gal) および Rion 社製 LS-40C (測定範囲 : $\pm 2,000$ gal, 仕様上の分解能 : 10^{-4} gal/ $\sqrt{\text{Hz}}$) を設置した。本実験において、CV373 では一般的に構造物の振動計測で用いられることが多い 200 Hz のサンプリング周波数で、LS-40C では既往の研究で示唆されている損傷発生時の高周波応答を詳細に調べる目的で 10 kHz のサンプリング周波数で計測を行った。

なお、200 Hz サンプリングでは CV373 に実装されているアンチエイリアシングフィルタ (カットオフ周波数 100 Hz) によりエイリアシングの影響を除去している。一方、LS-40C にはアンチエイリアシングフィルタは実装されていないものの、10 kHz サンプリングではそのナイキスト周波数である 5 kHz 以上の成分のスペクトルの大きさが 5 kHz より低い振動数のスペクトルの大きさに対して十分に小さいと考えられるため、エイリアシングの影響はほとんど無視できると考えられる。

(2) 10 kHz, 200 Hz それぞれのサンプリング周波数で計測した加速度応答の損傷発生時の特性

図-5 は損傷がはじめて発生してから新たな損傷の発生がみられなくまるまでの 4.5 秒間の 10 kHz,

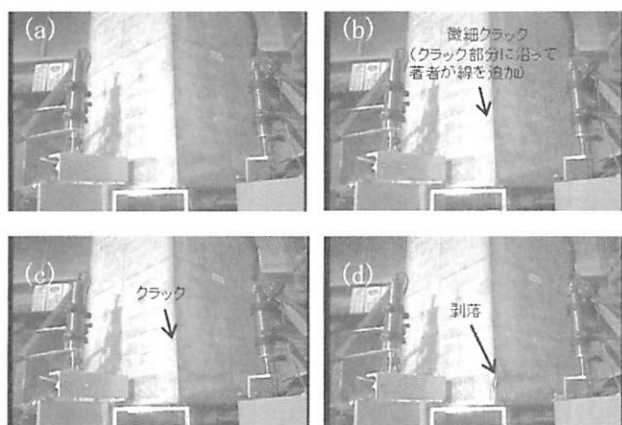


図-8 RC柱基部のビデオ映像 ((a): 0秒における損傷がないと考えられる状態, (b) P_3 : 微細なクラックの発生 (映像の解像度の問題でクラックの位置がわかりにくいため, クラックに沿って赤線を引いている), (c) P_4 : クラックの発生, (d) P_6 : コンクリートの剥落が発生)

200 Hzそれぞれでサンプリングした加速度応答波形 (以下, それぞれ Rion 10 kHz データ, CV 200 Hz データという) を同時に示している. 図-5 の $P_1 \sim P_{10}$ に示すように, Rion 10 kHz データには, CV 200 Hz データにはみられない明確な高周波成分が複数回観測されていることがわかる.

大きな高周波成分が観測された部分について詳細に分析するため, 図-6(a)には図-5 の 0 秒～2 秒までのデータを拡大したものを示している. 図-7 は図-6(a)と同時刻に観測された加振方向の南北 2 隅の主鉄筋ひずみデータ ((a), (b)それぞれで 17,000 μ 付近でひずみの値が一定値を示しているのは計測器のレンジを超えたためである), 図-8(a)～(d)はそれぞれ 0 秒 (無損傷時), P_3 , P_4 , P_6 それぞれにおける RC 柱基部のビデオ映像を抽出したものを示している.

図-7 より P_1 と P_2 の時刻において加振方向の南北 2 隅の主鉄筋ひずみがそれぞれ鉄筋の降伏ひずみである約 2,000 μ に初めて達していることがわかる. また, P_3 , P_4 においては図-8(b)と図-8 (c)にそれぞれ示すように RC 橋脚基部のコンクリートにクラックが発生し, P_6 においては図-8(d)のコンクリートの剥離が生じていることがビデオの映像から確認できた. それら損傷の発生が確認できた時刻 $P_1 \sim P_4$, P_6 において, 図-6(a)の Rion 10 kHz データには高周波成分が重畳されていることが観察される. 図-6(a)の P_5 においても Rion 10 kHz データに高周波成分がみられるが, 少なくともひずみデータ, 映像か

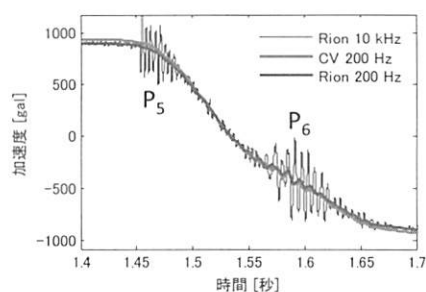


図-9 P_5 と P_6 付近 (1.4 秒から 1.7 秒まで)の加速度データの拡大, および CV 200 Hz データと Rion 10 kHz データを 200 Hz にダウンサンプリングしたデータ (Rion 200 Hz データ) との比較. ダウンサンプリングには, 100 Hz がカットオフ周波数のゼロ位相理想ローパスフィルタを使用した.

らは損傷などなんらかの状態の変化が発生していることは観察できなかった. また図-5 の時刻が 2 秒以降の高周波成分が発生しているデータについても分析したところ, 映像から P_7 , P_9 , P_{10} において微細なクラック, P_8 においてコンクリートの剥落が観察された.

Rion 10 kHz データに高周波成分がみられる原因として, 既往研究のシミュレーションにおいてクラックが閉じるときに衝撃波が発生することが示唆されていることから¹⁹⁾, クラックの発生など衝撃的な現象に起因している可能性がある. 実際, 上述した通り P_3 , P_4 , P_6 , $P_7 \sim P_{10}$ においてはクラックとコンクリートの剥落 (以下, クラックなどという) が発生していることが映像から確認された. これは, クラックなどが発生したことにより橋脚基部に局所的に生じた衝撃波が橋脚天端に伝達されて観測されたものと考えられる.

一方, 他に高周波成分が確認できた P_1 , P_2 , P_5 においては映像からクラックなどは観察できていない. ただし, P_1 , P_2 においては図-7 から降伏するほどのひずみが主鉄筋に発生していることから, また P_5 においては既に P_3 , P_4 でクラックの発生を経験した後ということと加速度 - 変位履歴から橋脚が十分に非線形領域に入っていることから, P_3 , P_4 , P_6 , $P_7 \sim P_{10}$ 同様にクラックなどが発生していた可能性は否定できない. P_1 , P_2 , P_5 においてもクラックなどが発生していたと仮定すると, 映像の解像度の問題で実際には発生していた微細なクラックを見つけられなかったことやビデオの死角となっている部分でクラックなどが発生していたため観察できなかった可能性がある. P_3 , P_4 , P_6 , $P_7 \sim P_{10}$ などにおいて実

際にクラックなどが発生していたことや、上記の P_1 , P_2 , P_3 に関する考察などから、10 kHz でサンプリングした場合には、RC 橋脚天端部の加速度に生じるクラックなどの発生に伴う高周波成分を捉えられる可能性があることがわかる。

次に図-6(a)の CV 200 Hz データをみると Rion 10 kHz データとは異なり、 $P_1 \sim P_6$ において明確な変化を観察できないことがわかる。しかし、 P_5 と P_6 付近を拡大した図-9 を詳しくみると、 P_5 ではほとんど滑らかであるものの、 P_6 においては CV 200 Hz データにもわずかに波形に乱れが生じていることがわかる。図-9 には、同時に Rion 10 kHz に 100 Hz のカットオフ周波数のゼロ位相理想ローパスフィルタを掛けて 200 Hz にダウンサンプリングしたデータ（以下、Rion 200 Hz という）も示している。Rion 200 Hz データが CV 200 Hz データとほぼ同様の波形となっていることから、 P_6 付近の CV 200 Hz データのわずかな乱れは、エイリアシングなどの計測エラーによるものではないと考えられる。CV 200 Hz あるいは Rion 200 Hz の P_6 付近の乱れは不連続的な変化や局所的な急激な勾配の変化のようにもみえることから、図-1 に示すような波形上の特異点となっている可能性がある。そこで、それぞれの時点が特異点として検出できるかを調べるために連続ウェーブレット変換を行った。

CV 200 Hz データの波形の乱れが前述の通り不連続的な変化や急激な勾配の変化だとすると、それらは Lipschitz-Hölder 指数が 0~1 付近の値をもつ特異点であると考えられる。2 章で述べた通り、そのような特異点は消失モーメントの次数が 1 以上のウェーブレットであれば検出できる。本論文では、安全側で考え 1 次よりも十分に大きい 5 次の消失モーメントをもつ Daubechies ($N = 5$) ウェーブレットを用いることにする。

Daubechies ($N = 5$) ウェーブレットを使って図-6(a)の CV 200 Hz データを連続ウェーブレット変換した結果が図-6(b)である。図よりたとえば P_1 , P_2 , P_6 において、他の時刻に比べて低スケールから高スケールまで長く伸びるスペクトルがあることがわかる。 P_6 の高スケール付近においてスペクトルがほぼ三角形状になっているように見え、影響円錐に近い反応と考えられる。この理由として損傷発生により CV 200 Hz データがわずかに乱れ、特異点に近い変化をした可能性が考えられる。

しかし、たとえば P_2 においてはいくつかの反応が混在しており、影響円錐かどうかを判断することは簡単ではないようにみえる。また損傷が発生した

可能性のある P_5 や実際に損傷を確認できた P_3 , P_4 においての反応はクリアではなく必ずしもウェーブレットスペクトルの傾向のみから、その時刻に特異点があるかどうかはいえない。さらに、たとえば損傷がないと考えられる P_0 に広帯域に強く反応する影響円錐のようなウェーブレットスペクトルの反応があることや、 $P_1 \sim P_6$ 以外の時刻に $P_1 \sim P_6$ の反応と簡単には区別できないような反応が多数みられることもわかる。これは、ウェーブレットスペクトルが必ずしも特異点においてのみ強い反応を示すというわけではなく、ウェーブレット変換の性質上特異点でなくても振幅が大きい点であればよりウェーブレットスペクトルの反応も大きくなり、また広帯域特性をもっている波形上の点においては低スケールから高スケールまで影響円錐に類似した反応をするためであると考えられる。

これらのことから CV 200 Hz データにおいても、損傷時に波形が特異的に変化している可能性はあるが、非損傷時に比べて必ずしもその反応が大きくクリアであるわけではないため、単純にウェーブレットスペクトル上の影響円錐の有無から損傷を検出することは困難であるといえる。

(3) Lipschitz-Hölder 指数の推定と損傷発生の有無との比較分析

前節の結果からウェーブレットスペクトルの反応のみからクラックなどの損傷が発生したあるいは発生した可能性のある点とそれ以外の損傷が発生していない点とを区別することは困難であった。そこで本節では、2 章で述べたウェーブレット変換を用いた方法により波形各部分での Lipschitz-Hölder 指数を推定し、定量的な指標により損傷の有無を判定することを試みる。

各時刻での Lipschitz-Hölder 指数を推定した結果が図-10(b)である。この図から損傷の発生が確認された、あるいは損傷が発生した可能性のある $P_2 \sim P_4$, P_6 , P_8 , P_{10} において Lipschitz-Hölder 指数が 0.5 より小さく 0 に近い値になっており、その他の時刻における指数の値よりも小さくなっていることがわかる。これは $P_2 \sim P_4$, P_6 , P_8 , P_{10} においては、損傷により 200 Hz でサンプリングした加速度波形がわずかに乱れ、Lipschitz-Hölder 指数が 0 に近い、すなわち図-1 よりステップ関数に近い変化をする特異点を有することを示している。Lipschitz-Hölder 指数は時刻歴上の振幅の反応の大小によらずあくまで関数の特異性、すなわち微分可能性を評価できるため、このようにわずかな波形の特異的な乱れもクリアに捉え

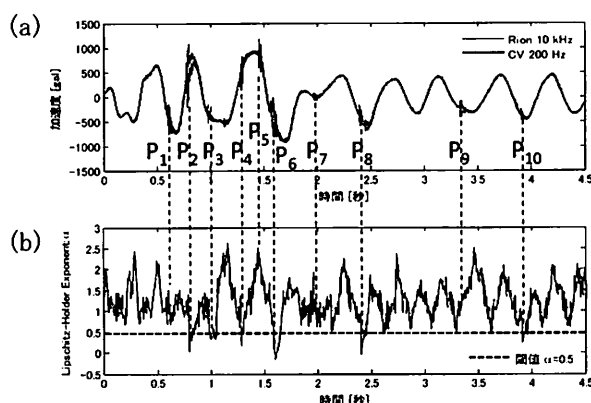


図-10 図-5 の波形各時刻での Lipschitz-Hölder 指数を推定した結果 ((a): 図-5 の加速度データ, (b): Lipschitz-Hölder 指数).

られたと考えられる。

一方、図-10(b)より非損傷時のすべての時点の Lipschitz-Hölder 指数は 0.5 以上となっているが、上記の $P_2 \sim P_4$, P_6 , P_8 , P_{10} 以外の P_1 , P_5 , P_7 , P_9 についても同じく 0.5 以上の値となっているため、これらについては検出できていないことになる。 P_1 , P_5 , P_7 , P_9 での Lipschitz-Hölder 指数が $P_2 \sim P_4$, P_6 , P_8 , P_{10} に比べて大きくなった原因はそれぞれの波形の性質の違いによるものと考えられる。たとえば、図-9 から、CV 200 Hz データおよび Rion 200 Hz データの P_6 では波形が乱れているが、 P_5 においては乱れはほとんど確認できない。さらに、CV 200 Hz データおよび Rion 200 Hz データの $P_1 \sim P_{10}$ すべてについて同様に確認したところ、 $P_2 \sim P_4$, P_6 , P_8 , P_{10} に比べて P_1 , P_5 , P_7 , P_9 には乱れはほとんどなかった。これは、損傷ごとに今回計測した RC 橋脚天端部での加速度波形の乱れ方が違ったためと考えられる。その原因として、たとえばクラックなどの大きさやその位置の違いによる発生した衝撃波そのものの性質が異なったり、あるいは衝撃波が発生したクラックなどの位置から観測点までの伝搬経路が異なった可能性がある。

しかし、すべての損傷を捉えられていないにしても、今回のように Lipschitz-Hölder 指数にある閾値を設定することで損傷発生が発生した時刻をリアルタイムに検出できる可能性があることがわかる。今回の場合、非損傷時の Lipschitz-Hölder 指数の最小値がおおよそ 0.5 であったが、損傷を検知する上でこの値がどれほど妥当については今後、さまざまな大きさや構造の橋脚の実験データに適用することで統計的に検討する必要がある。そうすることで、非損傷時と損傷時の時点をよりロバストに区別できる

Lipschitz-Hölder 指数の値をみつけれられる可能性がある。

4. 結論

本研究の目的は、地震時の構造物の損傷発生の有無を損傷時に発生する加速度波形のわずかな特異的な変化から信号処理により検知することである。そのために Lipschitz-Hölder 指数という特異点の性質を定量的に評価できる数学的な指標に着目した。本研究での損傷検知では橋脚に設置された1つの加速度計のみを用いることを想定し、またそのサンプリング周波数は通常の地震計測で使われている数 100 Hz とすることを念頭に置いている。

特異点を検出する方法に連続ウェーブレット変換の三角形状の反応である影響円錐を用いる方法があるが、定量的な指標でないため特異点の有無の判定が困難という問題があった。そこで本研究では各時間区間での Lipschitz-Hölder 指数の値を推定し損傷に伴う波形の特異点を検出することを試みた。

RC 柱-地盤基礎振動破壊実験において RC 柱天端で計測された加速度応答に本手法の適用することで、その有効性を確かめた。

以下に本研究の成果をまとめる。

a) 損傷の加速度波形への影響の分析と影響円錐による損傷検知の限界

損傷発生時において、RC 橋脚の天端部で計測される加速度に現れる影響を、振動台実験にてまず高周波 (10 kHz) でサンプリングすることによって調べた。その結果、映像やひずみの情報から損傷が発生したと考えられる時刻に高周波成分が重畳されていることが観察された。これはコンクリートのクラックの生起やコンクリートの剥落により局所的に生じた衝撃波によるものと考えられる。

また、同じ実験においてサンプリング周波数 (200 Hz) で計測した加速度においてもわずかな特異的な乱れがみられる場合があった。連続ウェーブレット変換をしてその時点でのウェーブレットスペクトルの反応を調べた結果、影響円錐により損傷発生時刻を捉えられる場合もあったが、損傷があるにも関わらずウェーブレットスペクトルの反応がクリアでない時刻もあり、また非損傷時の反応と区別がつかないという問題があった。

b) Lipschitz-Hölder 指数による損傷検知の試み

ウェーブレットスペクトルのみから特異点の有無を断定することが困難であったため、波形の各

時刻における Lipschitz-Hölder 指数を推定した。その結果、すべてではないものの損傷が発生していないと考えられる時刻よりも損傷が発生したあるいは発生したと考えられる時刻において相対的に小さな値となり、閾値 (Lipschitz-Hölder 指数=0.5) を設定することで損傷発生の有無を定量的に判定できることが確かめられた。これより、Lipschitz-Hölder 指数を使うことで、定量的な指標によりリアルタイムに加速度応答から損傷を検知できる可能性を示した。

謝辞

本研究に際して、京都大学大学院工学研究科高橋良和准教授には、実験における貴重なデータのご提供やご助言を頂きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 道路橋の損傷を瞬時に計測するシステムの開発に成功: 科学技術振興機構, No. 623, 2009. <http://www.jst.go.jp/pr/info/info623/index.html> (閲覧日: 2015年1月23日)
- Ko, J. M. and Ni, Y. Q.: Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering Structures*, Vol.27, pp.1715-1725, 2005.
- Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M. and Shimada, A.: Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor, *Optical Fiber Technology*, Vol.7, pp.45-64, 2001.
- Yoon, D. J., Weiss, W. J. and Shah, S. P.: Assessing Damage in Corroded Reinforced Concrete using Acoustic Emission, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.3, pp.273-283, 2000.
- 長山智則, B. F. スペンサー, 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのモデルウェア開発, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.523-535, 2009.
- Spencer, B. F., Nagayama, T. and Rice, J.: Decentralized structural health monitoring using smart sensors, *Proc. of Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, Vol.6932, San Diego, CA, USA, pp.1-14, 2008.
- 堺淳一, 運上茂樹: 土木研究所の新技术(39)RC橋脚の地震損傷を検知・診断する地震被災度判定システム, 土木技術, Vol.64, No.10, pp.67-71, 2009.
- Mizutani, T., Hida, T., Fujino, Y. and Nagayama T.: Detection of State Changes of RC Columns in Shaking Table Tests by Singularity Analysis of Their Acceleration Responses, *Proc. of International Association for Life-Cycle Civil Engineering*, Waseda, Japan, pp.377-383, 2014.
- Mizutani, T., Hida, T. and Fujino, Y.: Damage Detection of RC Columns in Shaking Table Tests by Singularity Analysis of Their Acceleration Responses, *Proc. of the IABSE Symposium Madrid 2014*, Spain, pp.784-785, 2014.
- Mallat, S. and Hwang, W. L.: Singularity Detection and Processing with Wavelets, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 9, pp.617-643, 1992.
- Mallat, S.: *a wavelet tour of signal processing The Sparse Way Third Edition*, Academic Press, pp.205-261, 2009.
- Nakamura, T., Horio, H. and Chiba, Y.: Local Hölder Exponent Analysis of Heart Rate Variability in Preterm Infants, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.53, No.1, pp.617-643, 2006.
- Daubechies, I.: *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, pp.289-311, 1992.
- Mandelbrot, B.: *The Fractal Geometry of Nature*, Society for Industrial and Applied Mathematics, W. H. Freeman and Company, New York, pp.373-374, 1982.
- Feder, J.: *Fractals*, Plenum Press, New York and London, pp.75-84, 1988.
- Addison, P. S.: *The Illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Talor & Francis Group, New York, pp.33-35, 2002.
- 西村俊亮, 佐々木義志, 高橋良和: 構造物が非線形化する場合の構造物-杭基礎-地盤システムの動的相互作用効果の検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.493-503, 2013.
- 高橋良和, 小林望: 縮小 RC 模型 16 体一斉加振実験による地震応答の不確定性評価, 第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.269-276, 2011.
- 堺淳一, 川島一彦: ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.935-946, 1999.