

局所支配的 Hölder 指数による RC 橋脚上加速度応答波形からの 損傷有無のスクリーニング手法の提案

東京大学 正会員 ○水谷 司
日揮株式会社 EN テクノロジーセンター 正会員 肥田隆宏

1. 研究背景と目的

地震発生後には橋梁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。ただし現状ではすべての構造物の状態を把握するためにはそれらすべてを目視点検する必要があるため、多くコスト・労力を必要としている。

本研究では、センサーの中でも比較的安価な加速度計のデータを信号処理により分析することで、地震後に損傷が発生した構造物の“あたり”をつける、すなわちスクリーニング技術の開発を目指している。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、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り、またそのサンプリング周波数は既存の地震観測用のものを考慮すると数百 Hz が現実的であると考えられる。

このような背景のもと著者らのグループでは、特に RC 橋脚を対象にして橋脚上の1箇所のみ加速度計を設置し、通常地震動観測用に使われる数 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の損傷時の特異的な変化を信号処理により検知することを試みている¹⁾。本論文ではこの特異的な変化を Hölder 指数²⁾という関数の微分可能性を示す指数によりを定量的に評価することで損傷時と非損傷時の特異性の違いから RC 橋脚の損傷を検知できることを実験的に示すことを目的とした。

2. マルチフラクタル解析による支配的 Hölder 指数の推定

波形の Hölder 指数の稠密性を調べる方法にマルチフラクタル解析という方法がある²⁾。マルチフラクタル解析により特異点から構成されるフラクタル波形の Hölder 指数の大きさとその稠密性との関係を示す図 1 に示すような放線状の特異性スペクトルを推定でき、そのピーク値から波形のもつ支配的 Hölder 指数を推定することができる。

本研究では一定区間ごとに加速度波形を分割し、それぞれの時間区間についてマルチフラクタル解析を適用することで支配的 Hölder 指数の時間変化を推定し、その変化から損傷を検知することを試みる。

3. 振動台実験データの支配的 Hölder 指数の推定とそれによる損傷検知の可能性の検証

(1) RC 橋脚—地盤基礎—一体モデル振動台実験

図 2 は縮小 RC 柱と地盤基礎を含めた振動破壊

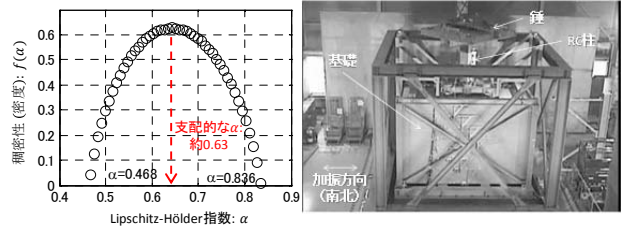


図 1 特異性スペクトル 図 2 RC 橋脚振動台実験

実験で、構造物と地盤の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。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、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 2 台の加速度センサ (CV373 および LS-40C) を設置した。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 では既往の損傷発生時の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。

(2) 局所支配的 Hölder 指数の推定による 200 Hz データからの損傷検知

図 1 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, 200 Hz それぞれでサンプリングした加速度応答波形を同時に示している。図 2 の P₁~P₁₀ 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。南北 2 隅の主鉄筋ひずみの時間変化を調べたところ、P₁ と P₂ の時刻において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った。また、P₃, P₄, P₆, P₇~P₁₀ においては図 4 のビデオ映像に示すようにクラックとコンクリートの剥落が発生していることが確認された。高周波成分は、クラックなどが発生したことにより橋脚基部に局部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。

次に図 2(a) の CV 200 Hz データをみると Rion 10 kHz データとは異なり、明確な変化を観察できないことがわかる。ただし、詳しく観察すると、たとえば P₆ のようにわずかに CV 200 Hz データにも乱れがある箇所がある。この乱れは特異的な変化とみなせる可能性があることから、前述のマル

キーワード RC 橋脚, 損傷, 局所支配的 Hölder 指数, スクリーニング, 加速度波形

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目-3-1 東京大学 本郷キャンパス工 1 号館 TEL03-5841-3562

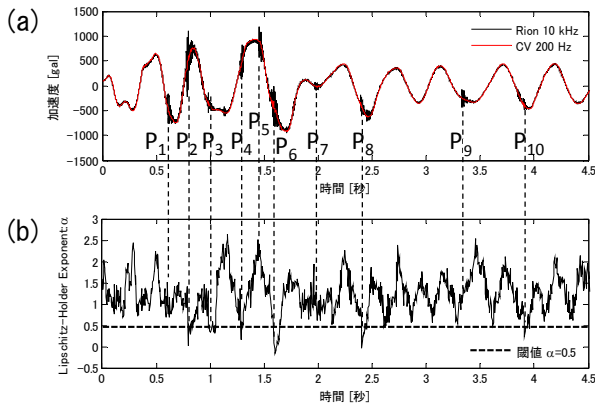


図3 (a) 加速度データ, (b) 局所支配的 Hölder 指数の推定結果

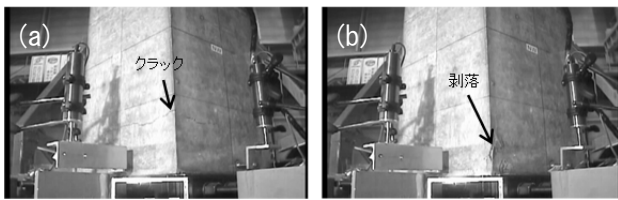


図4 (a) P₄: クラック, (b) P₆: コンクリートの剥落

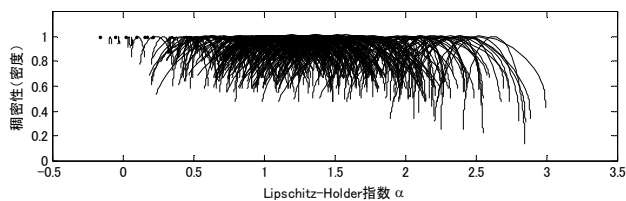


図5 CV 200 Hz データの各時間区間の特異性スペクトル

チフラクタル解析により得られる特異性スペクトルから波形の各時刻における局所的に支配的な Hölder 指数を推定し損傷の検知を試みた。

図3(a)に示す CV 200 Hz データをオーバーラップ率 95% の 0.075 秒間の矩形窓により分割して、それぞれの区間でマルチフラクタル解析を実行した。窓を動かしそれぞれの区間での特異性スペクトルを計算した結果を図5に示す。この図よりそれぞれの特異性スペクトルのピークを抽出して、各時刻での支配的 Hölder 指数を推定した結果が図3(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 P₂~P₄, P₆, P₈, P₁₀において 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 P₂~P₄, P₆, P₈, P₁₀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、Hölder 指数が 0 に近い変化をする特異点 (ステップ関数状の変化) を有することを示している。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られたと考えられる。

一方、図3(b)より非損傷時のすべての時点の Hölder 指数は 0.5 以上となっているが、上記の P₂~P₄, P₆, P₈, P₁₀以外の P₁, P₅, P₇, P₉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。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 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 Hölder 指数の最小値がおよそ 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 Hölder 指数の値をみつけられる可能性がある。

4. まとめ

RC橋脚-地盤基礎一体モデルの天端部で計測された200 Hzの加速度波形の各時刻における局所支配的なHölder指数を特性スペクトルのピーク値から推定して、その値から損傷を検知できるか検証した。200 Hzのサンプリングデータのそれぞれの区間での特異性スペクトルを計算し支配的な 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 (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、支配的な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、貴重なデータのご提供やご助言を多く頂きました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水谷司, 肥田隆宏: 支配的 Lipschitz-Holder 指数の推定による RC 橋脚の加速度応答波形からのリアルタイム損傷検知, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.188-197, 2015.
- 2) Mallat, S. and Hwang, W. L.: Singularity Detection and Processing with Wavelets, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 9, pp.617-643, 1992.