

マルチフラクタル解析を応用したカオス時系列解析による 微弱な加速度変化からの RC 橋脚の損傷検知

東京大学 正会員 ○水谷 司

1. 背景と目的：小数個の加速度センサのデータからの RC 橋脚の損傷検知の必要性

地震後インフラの状態を正確に把握することは、効率的に復旧を行う上で極めて重要である。現在では、災害発生後、主に目視点検することが一般的である。専門家が直接目視することにより、インフラの詳細な状態の把握とその対策案を検討できる一方で、道路橋や鉄道橋だけに着目した場合でもその数は膨大であり、時間と労力がかかってしまう。そこで近年、安価になりつつある加速度センサなどをインフラに設置し、そのデータから状態を評価する試みがされている。ただし、センサが安価になってきたといっても、たとえば一つの橋脚に多数のセンサを取り付けるとするのはコスト面で現実的ではなく、より少ない数のセンサの情報からインフラの状態を評価する技術が求められているといえる。そこで、本研究では、国内に多数存在する RC 橋脚を対象に天端部に一つだけ設置した通常の地震動観測用の数 100 Hz サンプルングの加速度センサのデータにカオス理論に基いた信号処理手法を適用することで、RC 橋脚の損傷のリアルタイム検知を試みた。

2. マルチフラクタル解析を応用したカオス時系列解析による加速度の微弱変化からの損傷検知の提案

RC 橋脚の損傷をとらえる方法として、アコースティックエミッションを使う方法（以下、AE 法）がある。これは、クラックやコンクリートの剥落により発生する弾性波を検知するものである。その弾性波の周波数特性上、一般的には、AE 法によるコンクリートの損傷検知では、数 10 kHz 以上のサンプルング周波数の AE センサが用いられる。しかし、インフラに既設のセンサは地震観測用に設置されたものであることが多く、サンプルング周波数は 100 Hz ないし大きくても 200 Hz 程度である。しかも AE センサは地震観測用の加速度センサに比べて一般的には高価であるため、もし後者の加速度センサのデータから損傷の有無を判定できればコスト的にも、既設の加速度センサを一部利用できる可能性があるという点でもメリットは多いと考えられる。

数 100 Hz のサンプルングではクラックやコンクリートの剥落に伴う弾性波のほとんどの情報は失われてしまうが、物理的には損傷が発生した瞬間に構造物の状態が不連続的に変化すると考えられるため、わずかにデータに変化があると想像される。もしこの仮説が正しければ、数 100 Hz で観測した加速度波形の各時刻での変化を詳細に調べることで、損傷を検出できる可能性があると考えた。一般的に、波形の変化を調べる方法として、フーリエ変換による周波数分析法がある。たとえば、加速度波形が局所的に乱れる、すなわち高周波成分が重畳されると、周波数変化があると考えられるが、非乱れ成分（主波形）に対して、乱れの大きさが小さいとそのスペクトルの変化が小さく検出が困難であることや、リアルタイムで損傷を検知するために波形を分解すると周波数分解能が荒くなり周波数変化を正確に読み取ることが困難であるなどの問題がある。

そこで、著者はこれまで波形の局所的な変化を敏感に検出するための信号処理手法を提案してきた¹⁾。その一つにカオス信号処理の一種であるマルチフラクタル解析を発展させた方法がある。加速度波形が乱れた場合、瞬時的に波形の不連続度合いが変化すると考えられる。フラクタルとは、不連続点（数学的に厳密には不連続点を一般化した概念の「特異点」という）で構成される波形であるため、波形の局所的なフラクタル特性を調べることで、損傷が発生した瞬間を検出できるのではないかと考えた。フーリエ解析では、ある波形がさまざまな周波数の正弦波の集まりであると考え、もしある波形に乱れが加わると、新たな正弦波が加わったとみなせる。このアナロジーで、マルチフラクタル解析では、ある信号があってそれがさまざまなタイプのフラクタルにより構成されると考え、信号が変化した場合には、別のタイプのフラクタルが加わったとみなすことができる。この解析手法の利点としては、フラクタル性は不連続性のタイプにより特徴づけられるため、

キーワード マルチフラクタル解析, RC 橋脚, 損傷検知, 加速度波形, 微弱変化, カオス時系列解析

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東大本郷キャンパス工学部 1 号館 230 TEL 03-5841-6099

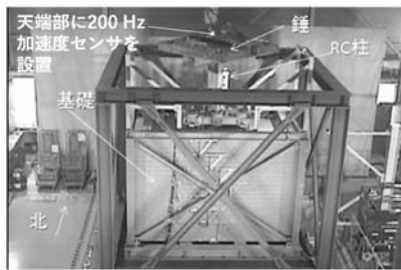


図1 RC橋脚—杭基礎振動
台実験²⁾

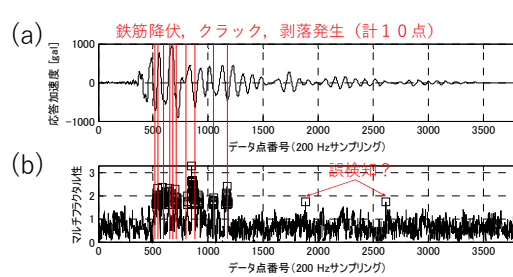


図2 (a)加速度応答波形と(b)各時間区
間のマルチフラクタル性の評価

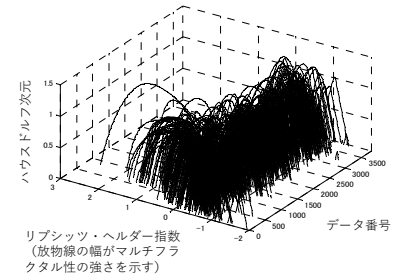


図3 マルチフラクタル解析に
よるカオス時系列解析

その振幅レベルが小さくても、不連続的な特性に変化があれば敏感に反応するという点である。そこで、加速度波形を局所的に分割して、各時間区間の波形のフラクタル特性の変化をマルチフラクタル解析により分析することにより、リアルタイムに損傷の有無を検出できる可能性があると考えた。

3. RC橋脚モデルの振動台実験データへのマルチフラクタル解析の適用とその有効性の検証

前章で提案した手法の有効性を検証するために、本手法を西村ら²⁾により実施された杭基礎を有するRC橋脚モデルの振動台実験データに適用することにした。図1に示すRC橋脚モデルの天端部に200 Hzの加速度センサ（東京測振社製CV373(測定範囲：±2,000 gal, 仕様上の分解能：0.03 gal)）を設置し、加振時の加速度応答を計測した。RC橋脚の基部の内部の鉄筋には、ひずみセンサが取り付けられ、鉄筋降伏の有無をモニタリングしており、また基部付近をビデオカメラにより撮影しクラックやコンクリートの剥落の発生が把握できるようになっている。入力波は、1995年に発生した兵庫県南部地震時に計測された「JR鷹取」波である。

計測した加速度応答を図2(a)に示す。この図において、鉄筋降伏、クラック、コンクリートの剥落の発生がビデオカメラの映像とひずみセンサのデータから確認された瞬間を赤線で示している。加速度波形各時点での局所的なフラクタル特性を調べるため、波形を0.16秒間隔で分解し、それぞれの時間区間の波形についてマルチフラクタル解析を適用した結果を図3に示す。この図の上に凸の放物線状の各波形は、各時間区間の波形のマルチフラクタル性を示すものであり、放物線状の波形の幅が広いほどさまざまなタイプのフラクタルが存在している、すなわちマルチフラクタル性が強いことを意味している。逆に幅が狭いほどより少ないフラクタル性により波形が表される、すなわちマルチフラクタル性が弱いことを意味している。前章で述べた通り、損傷が発生などで加速度波形が局所的にわずかに変化した場合、瞬時的に波形の不連続的な特性に変化が生じ、フラクタル特性に変化が生じるとの仮説を立てた。フラクタル特性の変化をここでは、マルチフラクタル性の強さを示す放物線状の波形の幅により評価することとし、その経時変化を調べた結果を図2(b)に示す。この図より、損傷の発生が確認された瞬間において、マルチフラクタル性が強くなっているように見える。そこで、この変化が有意であるかどうか検定するべく、確実に無損傷区間と考えられる振動開始から1.0秒間の数10 gal以下の微弱な振動波形のマルチフラクタル性の統計的分布に対して、有意水準約0.003%で外れ値検定を行った。その結果外れ値と検出された点を図2(b)に□で示している。この結果から、一部誤検知の可能性はあるものの、損傷が発生した瞬間の大半においてマルチフラクタル性に有意な変化があり、この手法により損傷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。

4. まとめ

インフラの地震時の損傷をリアルタイムに検知する技術を開発することを目標に、RC橋脚の振動台実験モデルの天端部に設置した1台の200Hzサンプリングの加速度センサのデータをカオス信号処理の一種であるマルチフラクタル解析により分析した。マルチフラクタル性の強さを信号の各時間区間で評価したところ、損傷発生時のマルチフラクタル性が有意に強くなり、それにより損傷を検知できる可能性があることを示した。

参考文献: 1) 水谷司, 肥田隆宏: 支配的Lipschitz-Hölder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) 西村俊亮, 佐々木義志, 高橋良和: 構造物が非線形する場合の構造物-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.