

RC 柱振動台実験での非線形地震応答波形からの ウェーブレット変換による状態変化の検出

東京大学	学生会員	○肥田 隆宏
東京大学	学生会員	水谷 司
東京大学	フェロー	藤野 陽三
東京大学	正会員	長山 智則
京都大学	正会員	高橋 良和

1. はじめに

地震発生後には建築物や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。点検方法としては目視や機器を使用した人手による検査が主に行われているが、すべての構造物を点検し使用を再開するためには長い時間が必要となることが問題である。これまでリアルタイムに構造物の状況を把握するためのシステム研究がなされてきたが、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。ただし、加速度情報のみから構造物の状態変化をリアルタイムで検知する手法は確立されておらず、課題であった。本研究では、大規模振動台実験の加速度データにウェーブレット変換を適用することで、構造物の状態変化を検出することを目的とした。近年では地震を想定した大規模振動台実験が多数行われておりデータを活用できることに注目し、時間領域の解析を精度良く行えるウェーブレット変換を用いることでリアルタイム検知を試みる。

2. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は時間方向に局在性があるため、時間領域での周波数解析ができる。また一部分の時間データのみで変換を行うこともできたためリアルタイムの解析を行うことも可能である。

関数 $x(t)$ の連続ウェーブレット変換は以下のように表される。

$$Wx(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{式 2.1})$$

ここで a, b はスケール、時間シフトのパラメータ、 ψ はウェーブレットである。*は複素共役を表す。また n 次の消失モーメントを持つウェーブレットは以下の条件を満たす。

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^m \psi(t) dt = 0 \quad (0 \leq m < n) \quad (\text{式 2.2})$$

この性質から n 階以下の導関数が不連続になる点(特異点)を検出することができる。

3. 加速度のウェーブレット変換と損傷発生と比較

構造物に損傷が生じると加速度波形に影響が表れ、特異点として検出できると考えられる。本研究では損傷が発生しその影響が表れていると予想される柱上部の加速度波形から検出される特異点を、映像、鉄筋ひずみ、復元力変位関係などから損傷発生時刻と比較することによって、損傷検知の可能性を論じる。

2007年に実施された E-Defense を用いた実大 RC 橋脚の震動破壊実験¹⁾のデータを用いて解析を行った。図1で示すように加速度波形の連続ウェーブレット変換から、数点が特異点として検出された。この特異点検出の時刻と主鉄筋ひずみを比較すると、①②でひずみが大きく増加した時刻と一致していることがわかる。この時、ひずみは降伏ひずみ(2000 μ) を大きく超えており、損傷が発生した時刻をウェーブレット変換によって検出できたと考えられる。また③は映像からかぶりコンクリートの剥落が見られた時刻とほぼ等しい。ただし、④は損傷発生を確認することができなかった。

キーワード 損傷検知, ウェーブレット変換, 振動台実験, 高周波サンプリング

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-5841-6097

4. 加速度データのサンプリング周波数による違いの検証

これまでの地震波観測では加速度を 200Hz のサンプリング周波数で計測することが多かったが、より高周波の成分に損傷の発生が影響を与えたのかを分析するために、別の RC 柱振動台実験において高周波のサンプリング(10kHz)との比較を試みた。その結果図 2 で示すように、200Hz サンプリングデータでは特異点として検出された点には、高周波の波が存在することがわかった。このケースでは高周波サンプリングの加速度の連続ウェーブレット変換によってある特定の周波数の波が検出された。200Hz サンプリングからは同時刻において特異点として検出されており、またこれらの時刻において損傷が発生していることが主鉄筋ひずみ、映像、復元力変位関係から確認できた。さらに他のケースとの比較からこの高周波の波は RC 柱の損傷の状況や地盤基礎の影響によって周波数などが異なり、検出点には損傷による差異があることも示唆された

5. 結論

振動台実験の加速度データのウェーブレット変換から特異点を検出した。この特異点が検出された時刻について、主鉄筋ひずみ、映像、変位等を用いて検討を行った。その結果、特異点検出時刻の多くは鉄筋降伏やクラックが発生した時刻を捉えられたと考えられる。すべての特異点が損傷の影響であるとは言えないが、損傷が発生した加振ケースの加速度波形からはすべて特異点が検出され、損傷検知の可能性が示された。また高周波サンプリングデータの解析からは損傷発生の検知の精度を上げられる可能性がわかった。一方で高周波数領域で観察された現象を 200Hz サンプリング信号からも特異点として検出できたことは、より低いサンプリング周波数の計測による信号でも状態変化をリアルタイム検知できることを示唆し、これは実際の橋梁等 RC 構造物への適用にとってメリットであると考えられる。

参考文献

1)右近大道, 梶原浩一, 川島一彦, 佐々木智大, 運上茂樹, 堺淳一, 高橋良和, 幸左賢二, 矢部正明: 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研究資料第 331 号, 2009 年 1 月

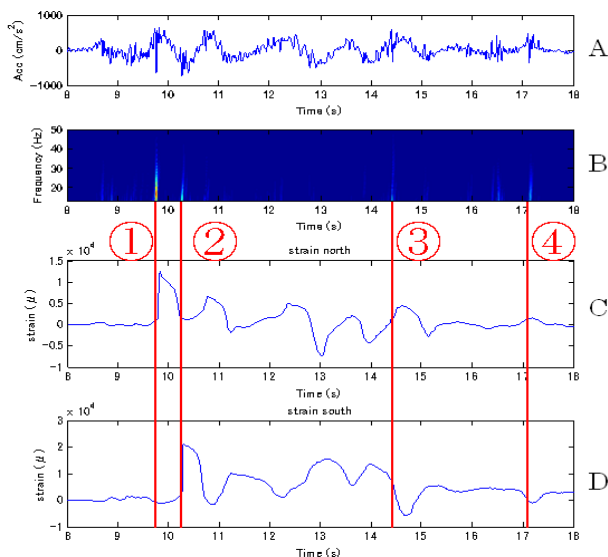


図 1 A:加速度波形 B:加速度の連続ウェーブレット変換
C,D:主鉄筋ひずみ 入力波:鷹取波 100%加振
柱上部, 橋軸直角方向の加速度
主鉄筋ひずみは橋軸直角方向の 2 か所

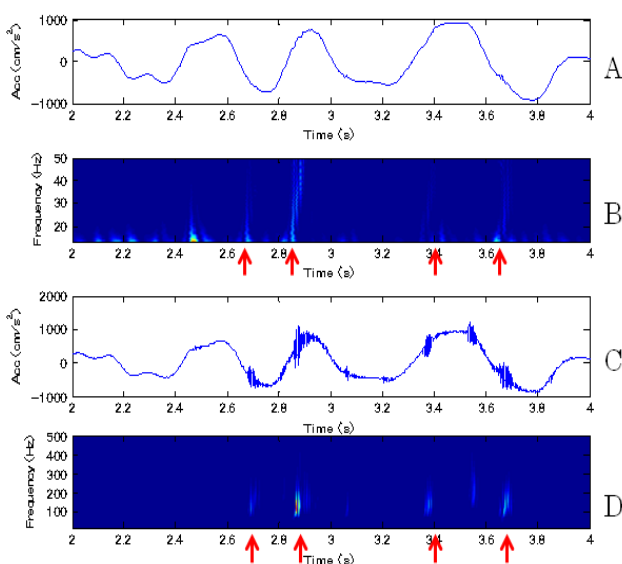


図 2 A:200Hz サンプリングの加速度波形
B:A の連続ウェーブレット変換
C:10000Hz サンプリングの加速度波形
D:Cno 連続ウェーブレット変換
柱上部, 加振方向の加速度, 鷹取波 100%加振
共にウェーブレットは Daubechies (消失モーメント N=5) を使用