

ウェーブレット変換による道路橋橋脚をモデル化した 回転1自由度系の経年劣化抽出

山下典彦¹・前川広基²・宮脇幸治郎³・太田充紀⁴

¹正会員 博士（工学）大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科（〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1）

²学生会員 大阪産業大学大学院 工学研究科（〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1）

³博士（工学）大阪府立工業高等専門学校名誉教授（〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12）

⁴正会員 大阪産業大学助手 工学部都市創造工学科（〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1）

1. はじめに

高度経済成長期に大量に整備された構造物の劣化が社会問題の1つとなっている。この劣化を評価することは維持管理や更新を行って行く上で重要であると共に、構造物の耐用年数期間内に生じると考えられる損傷や劣化に伴う評価法を確立する必要がある。構造物に地震動等の外乱が作用し損傷が生じると元来持っていた性能が低下し、固有振動数や減衰が変化する。これらを変化を捉えることができれば構造物の劣化の程度を評価しヘルスマニタリングが可能となる。曾根ら¹⁾は各種構造物が動的荷重を受けて疲労して損傷する場合に、その損傷の度合いをウェーブレット変換を用いて分析するヘルスマニタリングシステムを提案している。さらに、この手法の応用²⁾として、強震記録のウェーブレット変換によりバイリニア型の履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷を推定する手法を示している。また肥田ら³⁾は計測された加速度データからウェーブレット変換により特異点を検出し、その有無から構造物の損傷の有無を簡易にリアルタイムに判断する手法を提案し、その有効性をE-defenseで実施された実大RC橋脚の振動破壊実験にも適用し確認している。

構造物に生じた損傷を検知する際に用いられる手法としてフーリエ変換があるが、得られた周波数特性は全時刻歴波形の特性であり、時間の情報が欠落する欠点を持っている。これを改善する手法としてウェーブレット変換があり連続ウェーブレット変換が用いられることが多い。しかしながら、連続ウェーブレット変換では、基底関係が直交関係にないことから物理的な解釈を行うには注意が必要である。

一方、Mallat⁴⁾の定義した連続ウェーブレット変換のような変換関数の特性を含まない離散ウェーブレット変換がある。

本研究では、単柱RC橋脚を対象とし道路橋示方書耐震設計編(H24年版)で耐震設計⁵⁾を行い、得られた柱基部でのM- ϕ 関係を回転1自由度系モデル⁶⁾の曲げモーメント-回転角に適応し、Lemarieの方法⁷⁾により作成したスケール関数等⁸⁾を用いた離散ウェーブレット変換およびウェーブレットスペクトルにより加速度応答波形の特徴抽出を行った。その際、M- ϕ 関係については経年劣化を考慮し、曲げモーメントと回転角を共にn倍と仮定することで耐震性能の変化を検出できるかを検討した。

2. 橋脚のモデル化

地震時の挙動が複雑でない場合、RC橋脚の照査には、レベル1の地震動に対する耐震性能1では許容応力度法による安全性の照査、レベル2地震動に対する耐震性能2,3では、塑性変形を考慮した保有水平耐力および許容塑性率に基づく安全性の照査法を適用している。ここでは、図-1に示すRC矩形柱橋脚を設定⁹⁾し、「橋脚の設計(フォーラムエイト)」を用いて柱基部でのM- ϕ 関係を求める。そして求められた ϕ より θ を橋脚高さの5mから算出することにより、M- θ 関係が求まる。図-2に経年劣化を考慮するためにn倍したものを1.0から0.6の0.1刻みで示す。これを回転1自由度系モデルの復元モーメントとし、質点の質量を529.9tとすると固有周期は0.25sとなる。減衰定数を5%、時間刻みは時刻歴応答解析で0.001s、フーリエ解析およびウェーブレット解

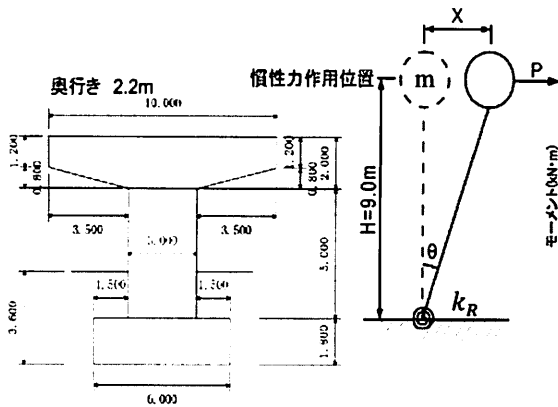
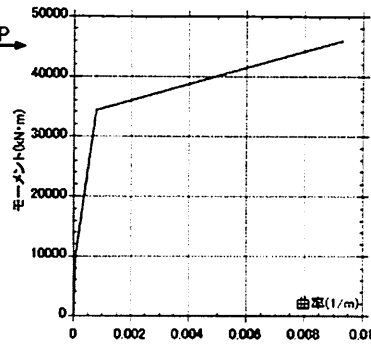
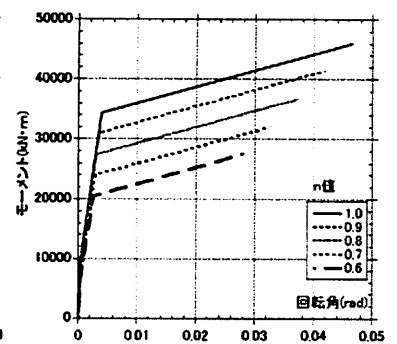


図-1 RC矩形柱橋脚



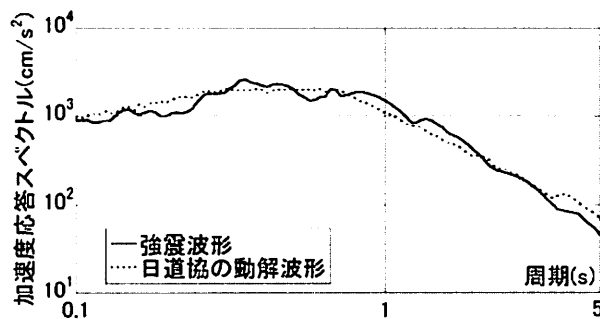
(a) M-φ関係



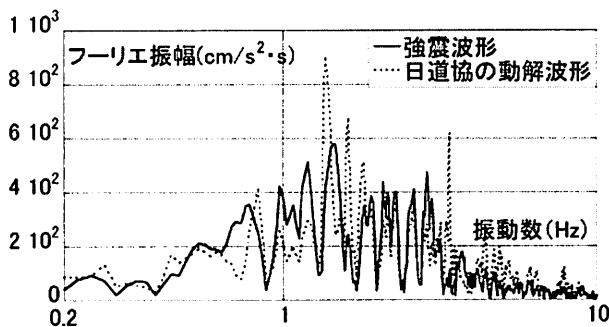
(b) M-θ関係

図-2 橋軸直角方向の骨格曲線

析で0.01sとし、入力地震動は図-3に示す兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の気象庁強震波形（以下、強震波形と呼ぶ）と（公）日本道路協会の道路橋の耐震設計における動的解析に用いる加速度波形（H24年度版対応）（以下、日道協の動解波形と呼ぶ）のNS成分を使用した。卓越している帯域は加速度応答スペクトルで0.5s付近、フーリエスペクトルで2Hz付近であることがわかる。



(a) 加速度応答スペクトル



(b) フーリエスペクトル

図-3 入力地震動

3. 解析結果

図-4に図-2(b)の n が1.0と0.6の場合の回転1自由度系モデルの絶対加速度波形、履歴ループ、絶対加速度波形のウェーブレット変換とフーリエスペクトルおよび変位波形を入力地震動ごとに示す。左側

が強震波形、右側が日道協の動解波形の結果で、絶対加速度波形から入力地震動の違いと最大加速度が非線形応答の影響で n が0.6の場合に小さくなっていることが読み取れる。

履歴ループから塑性率（トリリニアモデルの第1剛性と第3剛性をもとにバイリニアモデルとし、それらの交点を降伏変位とした）を求めると、強震波形では $n=1.0$ で8.44, $n=0.6$ で26.84, 日道協の動解波形では $n=1.0$ で5.95, $n=0.6$ で19.38となり、いずれの入力地震動においても $n=0.6$ で塑性率が非常に大きくなった。これは、経年劣化を考慮する上で曲げモーメントと回転角を共に n 倍したために降伏変位が過小評価となっているためであると考えられる。

ウェーブレット変換からウェーブレット係数 ($\text{m/s}^2 \cdot \text{s}$) の最大値は強震波形では $n=1.0$ で0.99 ($j=3$), $n=0.6$ で0.77 ($j=4$), 日道協の動解波形では $n=1.0$ で1.00 ($j=3$), $n=0.6$ で1.06 ($j=4$) となり経年劣化により分解係数 j が3から4にシフトし、周波数が小さくなり周期が長くなったことが確認できる。また、ウェーブレット係数の最大値が生じた時刻は経年劣化により n が小さい方が早くなっている。

フーリエスペクトルから平滑化によって求めた卓越振動数 (Hz) は強震波形では $n=1.0$ で2.07, $n=0.6$ で1.47, 日道協の動解波形では $n=1.0$ で1.66, $n=0.6$ で1.59となり経年劣化により卓越振動数が小さくなり卓越周期が長くなったことが確認できる。

変位波形から残留変位 (m) は強震波形では $n=1.0$ で0.043, $n=0.6$ で0.078, 日道協の動解波形では $n=1.0$ で0.030, $n=0.6$ で0.064となり経年劣化により残留変位が大きくなりそれぞれ1.8倍, 2.1倍となった。さらに入力地震動ごとに波形を重ねると位相のずれがみられたことから経年劣化により周期が長くなったことが確認できる。

図-5に図-4で違いが生じた分解係数が3,4のウェーブレット係数を入力地震動ごとに示す。左側が強震波形で右側が日道協の動解波形の結果で、ウェー

ブレット係数 ($\text{m/s}^2 \cdot \text{s}$) の最大値は強震波形では $n=1.0$ で 0.99 ($j=3, t=9.04\text{s}$) , 0.85 ($j=4, t=8.32\text{s}$) , $n=0.6$ で 0.57 ($j=3, t=9.04\text{s}$) , 0.77 ($j=4, t=8.00\text{s}$) , 日道協の動解波形では $n=1.0$ で 1.00 ($j=3, t=9.20\text{s}$) , 0.95 ($j=4, t=8.00\text{s}$) , $n=0.6$ で 0.75 ($j=3, t=9.20\text{s}$) , 1.06 ($j=4, t=6.72\text{s}$) となっている. 経年劣化により分解係数ごとのウェーブレット係数の最大値が生じた時刻に概ね違いは見られないが, 日道協の動解波形の $n=0.6, j=4$ で 1 秒程度早くピークが生じており, 図-4のフーリエスペクトルとの関連性があると思わ

れる. これらの影響を考察するために分解係数ごとの波形の特性が把握できるウェーブレットフーリエスペクトルを図-6に示し, この総和であるウェーブレットスペクトル⁸⁾を図-7に示す. ウェーブレットフーリエスペクトルから分解係数による大きな違いは把握できないが, ウェーブレットスペクトルから分解係数が2から3にかけて全ケースの傾きが大きく増加する特性をもっているだけでなく, 日道協の動解波形の $n=0.6$ では分解係数が3から4にかけても増加する特性をもっていることがわかった.

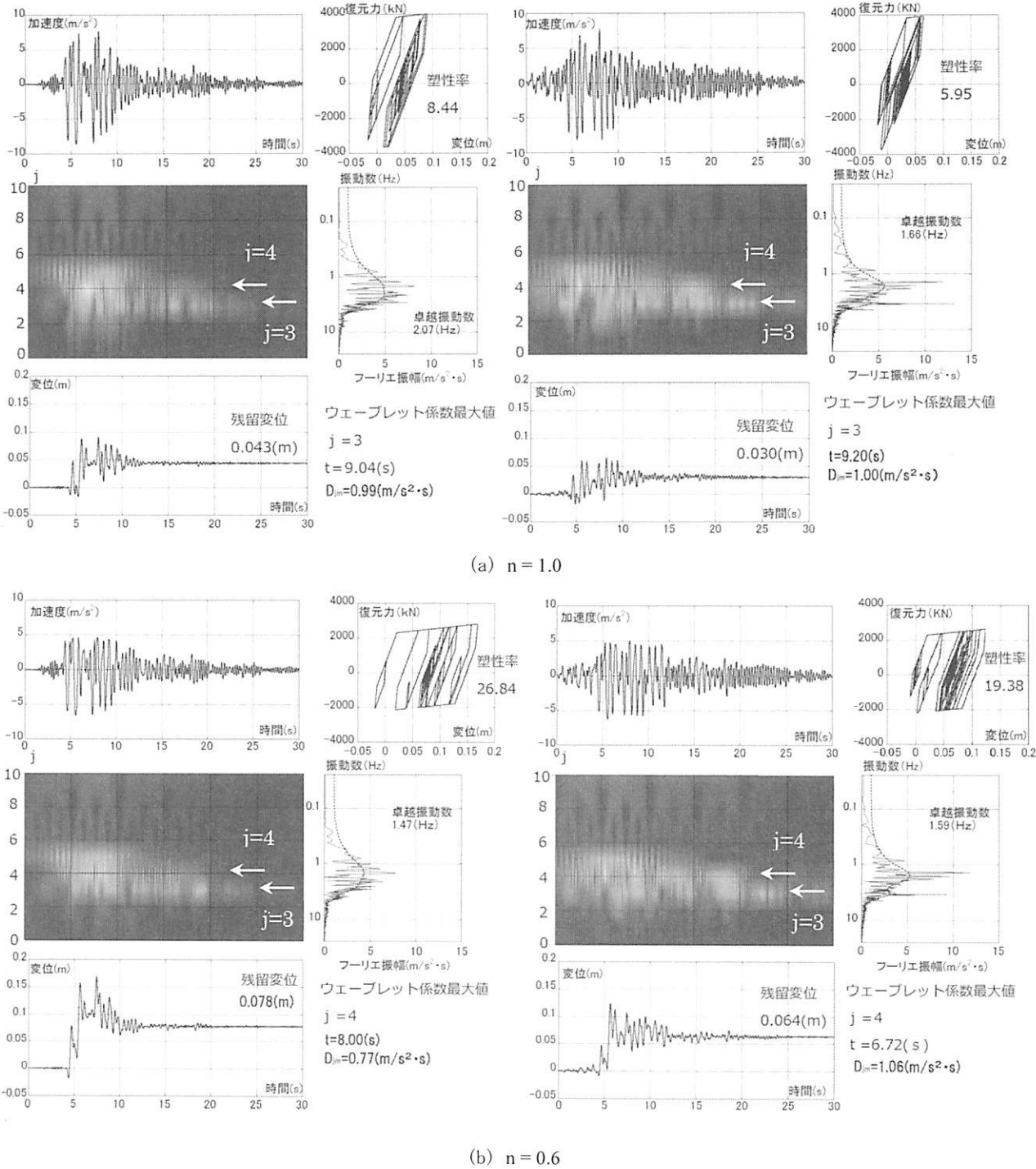
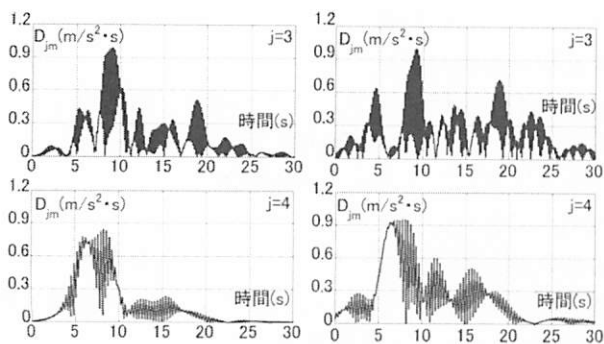
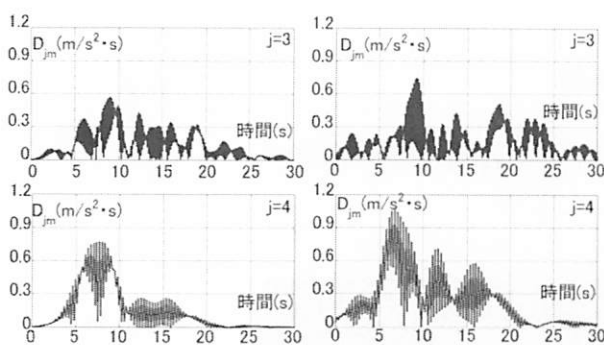


図-4 回転1自由度系の解析結果 (左側: 強震波形, 右側: 日道協の動解波形)



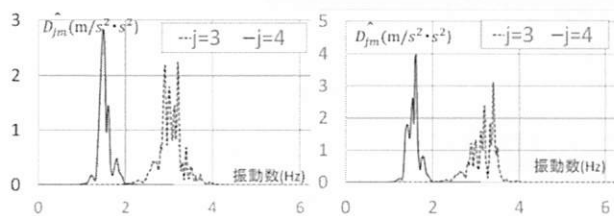
(a) $n = 1.0$



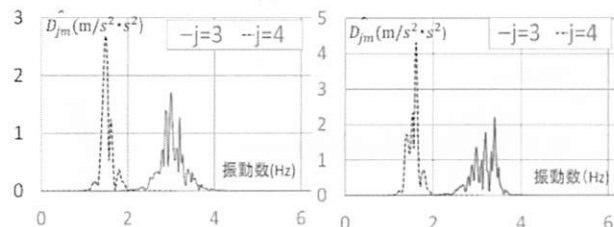
(b) $n = 0.6$

図-5 ウェーブレット係数

(左側：強震波形，右側：日道協の動解波形)



(a) $n = 1.0$



(b) $n = 0.6$

図-6 ウェーブレットフーリエスペクトル

(左側：強震波形，右側：日道協の動解波形)

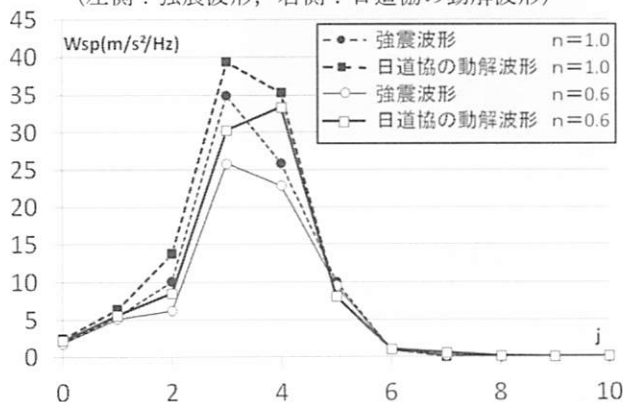


図-7 ウェーブレットスペクトル

4. まとめ

単柱RC橋脚を対象とした回転1自由度系モデルを用いて離散ウェーブレット変換およびウェーブレットスペクトルにより加速度応答波形の特徴抽出を行った。それらの結果をまとめると以下の通りである。

- 1) ウェーブレット係数の最大値から経年劣化により分解係数が増加し、周波数が小さくなり周期が長くなることが確認できた。
- 2) ウェーブレットスペクトルから分解係数の増減する特性を把握することで耐震性能の変化を検出できる可能性がある。

しかしながら、回転1自由度系モデルの設定やその非線形特性等について再考し、入力地震動および橋脚のモデル化の違いによる検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 曾根 彰，山本鎮男，有馬幸蔵，増田 新，中岡 明：ウェーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスモニタリングシステム（正規直交ウェーブレットの生成と断続的異常信号の検出），日本機械学会論文集（C編），61巻586号，pp. 2340-2346, 1995.
- 2) 曾根 彰，山本鎮男，増田 新，中岡 明，芦野隆一：強震記録のウェーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定，日本建築学会構造系論文集，第476号，pp. 67-74, 1995.
- 3) 肥田隆宏，水谷 司，高橋良和，藤野陽三：RC柱の非線形地震応答波形からのウェーブレット変換を用いた簡易な損傷検出手法の検討，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.70, No.2, pp. I_937-I_945, 2014.
- 4) Mallat, S.G.: A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.11, No.7, pp. 674-693, 1989.
- 5) 園田恵一郎：“道路橋示方書，耐震設計編（H24版）の理解を深めよう” 資料FEM勉強会（H24.9.29）
[http://femst.softrevolution.jp/bs/femst14/FEM勉強会\(H24.9\).pdf](http://femst.softrevolution.jp/bs/femst14/FEM勉強会(H24.9).pdf) <2015.2 アクセス>
- 6) 山下典彦，原田隆典：P-Δ効果が1自由度系の非線形応答に与える影響，土木学会地震工学論文集CD-ROM，pp. 1-8, 2003.
- 7) 前述 4), pp. 689-690
- 8) 宮脇幸治郎，土岐憲三：ウェーブレット解析による地震波特性に関する一考察，土木学会論文集，No.525/I-33, pp.261-274, 1995.
- 9) 土木設計研究会：基礎構造物の設計入門，土木設計研究会編，オーム社，pp.51-77, 2006.