

ウェーブレット変換によるRC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・三浦 輝之⁵

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)

⁵学生会員 大阪産業大学 工学部 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

高度経済成長期に大量に整備された構造物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。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自由度系モデルの曲げモーメント-回転角に適用し、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。

Key Words : *wavelet Analysis, RC bridge Pier, aging, rocking single degree of freedom system, non linear response analysis*

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。これらの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履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、基底関係が一次従属関係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⁾を行うことで、実際に現場で造られている橋脚と同じ条件のものを解析し、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-回転角に適用し、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倍と仮定し、経過年数で比較することにより耐震性能の変化を検出できるかを検討した。

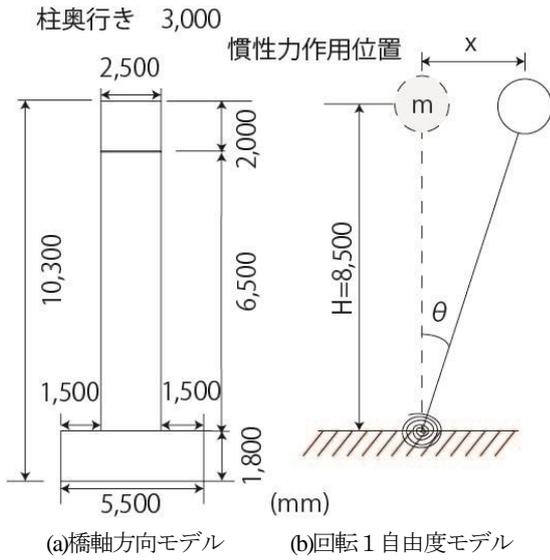


図-1 RC矩形柱橋脚（橋軸方向）

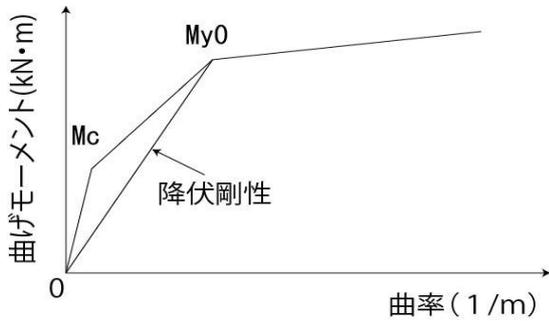


図-2 M-φ曲率関係

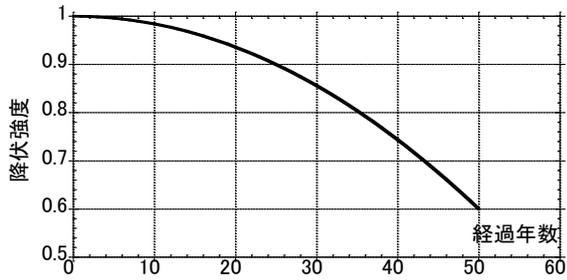
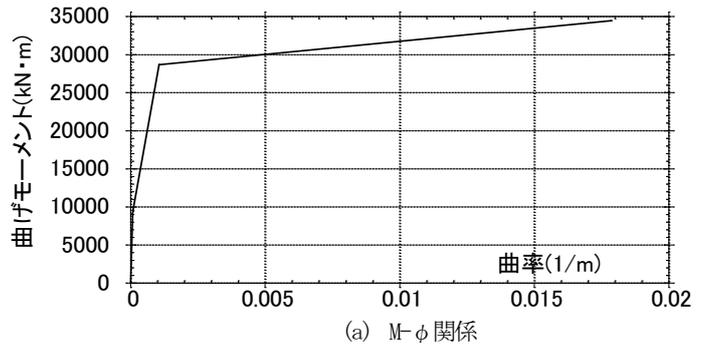


図-3 降伏強度 - 経過年数関係

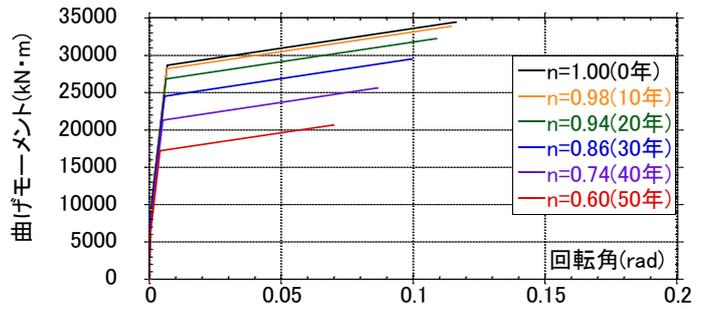
2. RC橋脚のモデル化

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⁹⁾。ここでは、図-1に示すRC矩形柱橋脚を設定し、橋軸方向の慣性力作用位置は、柱基部から8,500mmの位置とする。

橋脚の設計では、基礎構造物の設計入門¹⁰⁾を参考に橋脚断面寸法を500mmに丸め、躯体材料はコンクリート強度24.0(N/mm²)と柱主鉄筋材質および柱帯鉄筋材質は鉄筋SD345を使った。「橋脚の設計（フォーラムエイト）」

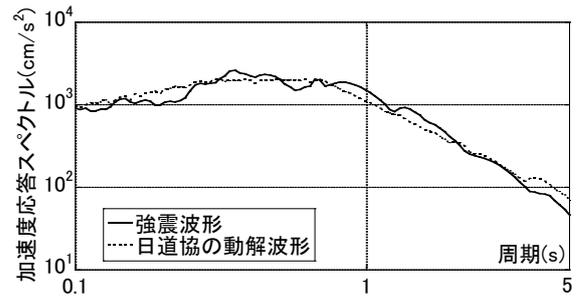


(a) M-φ関係

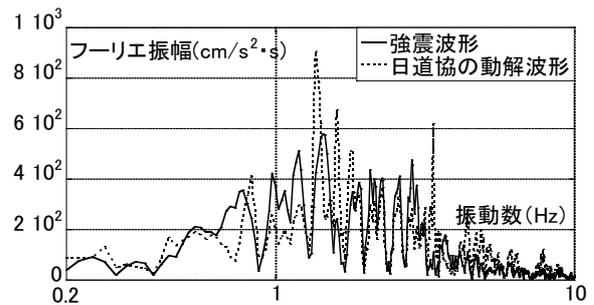


(b) M-θ関係

図-4 橋軸方向の骨格曲線



(a) 加速度応答スペクトル



(b) フーリエスペクトル

図-5 入力地震動

を用いて、橋軸方向の柱保有耐力方向高さを50分割し各間隔ごとに曲げモーメント - 曲率関係を求め、図-2に示す柱基部のM-φ関係が求まる。Mc点をひび割れ、My0点を初降伏とする。

レベル2地震動に対する耐震性能を照査するとき、橋脚の降伏剛性を用いて固有周期を算出するには、原点とMy0を直線で結んだ値を用いた。そして求められたφよりθを柱高さ（柱基部 - はり下面）の6,500mmから算出する

ことにより、 $M-\theta$ 関係が求まる。

経年劣化を決めるときにIidaら¹¹⁾は、耐用年数を50年として、50年後の降伏強度が指数関数にしたがって40%低減すると仮定しており、それを参考に n の値を決めた。図-3に、降伏強度と経過年数の関係、図-4は、図-3を基に経年劣化を考慮するために曲げモーメントと回転角を共に n 倍したものを示す。これを回転1自由度系モデルの復元曲げモーメントとし、質点の質量は橋脚が支える死荷重反力と梁部と柱部の重量合計から484.3tとなる。

固有周期は、 $M-\theta$ 関係の回転ばねから柱高さを用いて水平ばねに置き換えた。質量と水平ばねから求めた固有周期は、0.44 sとなる。微小時間は、入力地震動を時刻歴応答解析(増分法、 $\beta=1/6$ 、減衰定数5%)で0.001sに線形補間し、フーリエ解析およびウェーブレット解析では結果に影響しないので間引いて、0.01sに合わせた。入力地震動は図-5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)¹²⁾(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。

3. 離散ウェーブレット変換について

図-6に離散ウェーブレット変換のフローを示す。離散データ $f(t_k)$ はフーリエ変換により $F(Y)$ に変換され、ファザーウェーブレット関数 $\phi_j(Y)$ を用いたリゾリューション変換より、リゾリューションフーリエスペクトル \hat{A}_j に変換される。次に、 \hat{A}_j をマザーウェーブレット関数 $\psi_j(Y)$ を用いることでウェーブレットフーリエスペクトル \hat{D}_j が求められる。さらに、再起演算により分解係数 j ごとのデータを抽出する。ここで、ウェーブレットフーリエスペクトル \hat{D}_j は分解係数 j ごとの波形特性が把握できるもので、 df を解析波形の dt で求め、分解係数 j ごとのデータ数が使われる。このウェーブレットフーリエスペクトル \hat{D}_j を逆変換することにより、ウェーブレット係数 D_{jm} が導き出される。ウェーブレット係数 D_{jm} は2つのパラメータ j, m を持っており、 j は振動数、 m は時間に対応した係数である。これにより、離散ウェーブレット変換は振動数成分と時間成分の2つの情報を読み取ることができる。

4. 解析結果

図-7に図-4(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

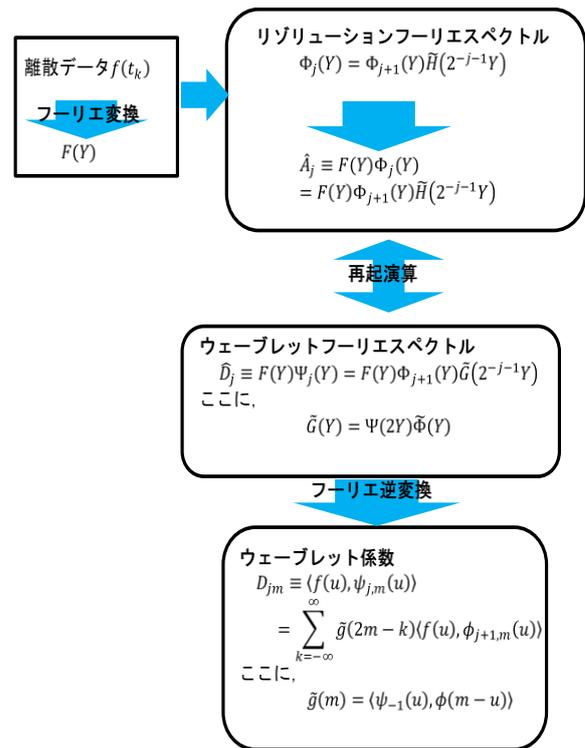


図-6 離散ウェーブレット変換のフロー

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、絶対加速度波形の最大値(m/s^2)は強震波形では $n=1.0$ で-8.49(5.56s)、 $n=0.6$ で-6.22(5.57s)、日道協の動解波形では $n=1.0$ で-8.14(5.57s)、 $n=0.6$ で-5.94(5.58s)となり、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。

$M-\theta$ 関係を復元力-変位関係に置き換えた履歴ループから塑性率を求めると、強震波形では $n=1.0$ で2.05、 $n=0.6$ で6.83、日道協の動解波形では $n=1.0$ で1.44、 $n=0.6$ で3.99となり、いずれの入力地震動においても $n=0.6$ で塑性率が大きくなった。

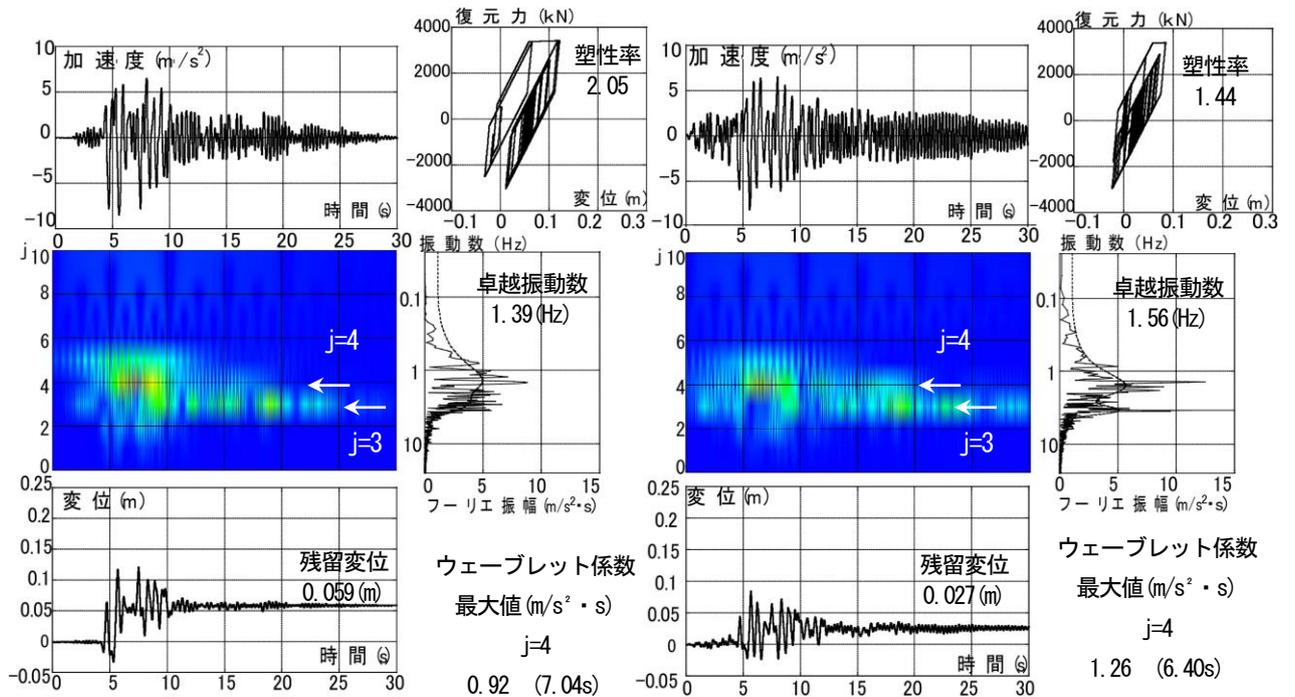
ウェーブレット変換からウェーブレット係数($m/s^2 \cdot s$)の最大値は強震波形では $n=1.0$ で0.92($j=4$)、 $n=0.6$ で0.82($j=4$)、日道協の動解波形では $n=1.0$ で1.26($j=4$)、 $n=0.6$ で1.23($j=4$)となった。

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1.39、 $n=0.6$ で1.34、日道協の動解波形では $n=1.0$ で1.56、 $n=0.6$ で1.51となり経年劣化により卓越振動数が小さくなりウェーブレット係数と同じ傾向が確認できる。

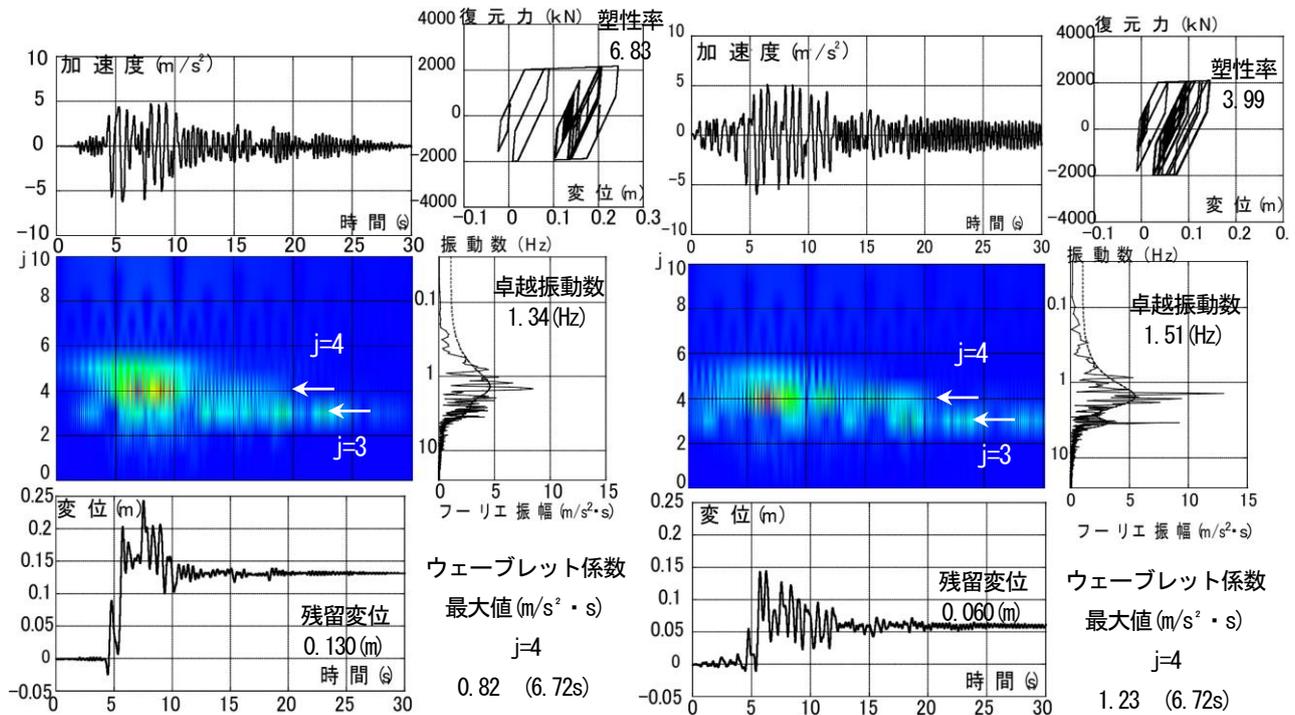
変位波形から残留変位(m)は強震波形では $n=1.0$ で0.059、 $n=0.6$ で0.130、日道協の動解波形では $n=1.0$ で0.027、 $n=0.6$ で0.060となり経年劣化により残留変位が大きくなり、両波形ともに2.2倍となった。

図-8に図-7で違いが生じた分解係数3,4のウェーブレット係数の絶対値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($m/s^2 \cdot s$)の最大値は強震波形では $n=1.0$ で $0.67(j=3, t=18.72s)$, $0.92(j=4, t=7.04s)$, $n=0.6$ で $0.41(j=3, t=19.12s)$, $0.82(j=4, t=6.72s)$, 日道協の動解波形では $n=1.0$ で $0.88(j=3, t=18.64s)$, $1.26(j=4, t=6.40s)$, $n=0.6$ で $0.57(j=3, t=18.64s)$, $1.23(j=4, t=6.72s)$ となっている。さ

らに、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から強震波形、日道協動解波形共に分解係数 $j=3$ と 4 とで時刻歴の特性が大きく異なっているのがわかる。すなわち、 $j=3$ では全継続区間で繰り返しくつかの山が現れているが、 $j=4$ では明瞭な2ないし3個しか山が現れていない。これは、分解係数の違いにより抽出されるスペクトルのバンドパスのバンド



(a) $n = 1.0$



(b) $n = 0.6$

図-7 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)

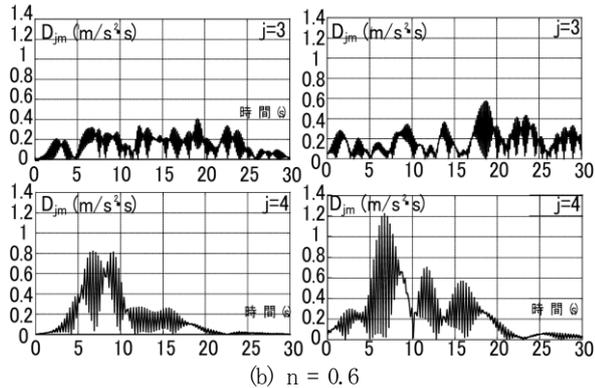
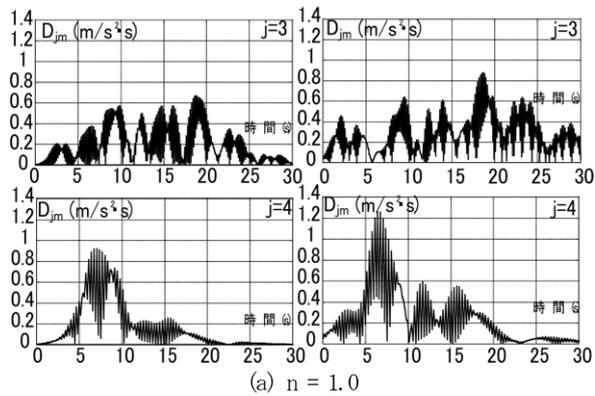


図-8 ウェーブレット係数
(左側：強震波形，右側：日道協の動解波形)

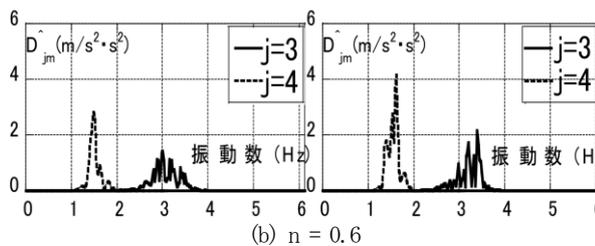
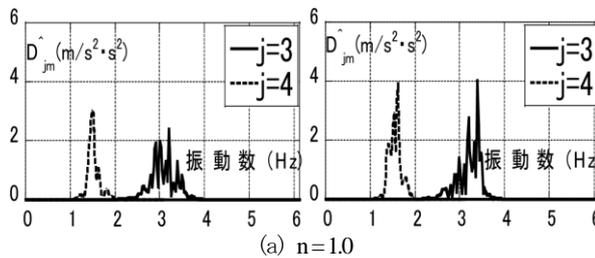


図-9 ウェーブレットフーリエスペクトル
(左側：強震波形，右側：日道協の動解波形)

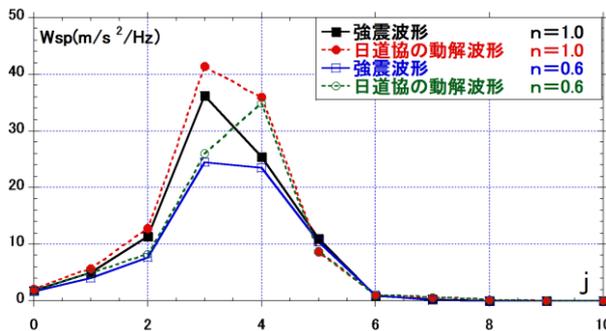


図-10 ウェーブレットスペクトル

違いによる結果を示している。

図-9 に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示す。ウェーブレットフーリエスペクトルの卓越振動数(Hz)は、強震波形では $n=1.0$ で $3.19(j=3)$ 、 $1.49(j=4)$ 、 $n=0.6$ で $3.00(j=3)$ 、 $1.49(j=4)$ 、日道協の動解波形で $n=1.0$ で $3.39(j=3)$ 、 $1.61(j=4)$ 、 $n=0.6$ で $3.39(j=3)$ 、 $1.61(j=4)$ となり、強震波形で分解係数3が経年劣化により振動数が小さくなり、この分解係数での卓越周期が長くなっていることが確認できる。日道協の動解波形では、分解係数3,4で $n=1.0$ で分解係数3の振動数のほうが卓越しているのに対し、 $n=0.6$ で分解係数4が卓越していることから、分解係数が増加し、振動数が小さくなり周期が伸びたことが確認できる。

図-10 にウェーブレットスペクトルを示す。加速度応答波形から求められた分解係数 j ごとのウェーブレットスペクトルは、経年劣化の指標 n によって異なった特性を示している。すなわち、強震波形では、 $n=1.0, 0.6$ とも $j=3$ でピークが現れているが、日道協の動解波形では、 $n=1$ で $j=3$ にピークが現れ、 $n=0.6$ で $j=4$ にピークが現れている。しかし、いずれの場合も、 $j=3$ で経年劣化の指標 n が 1.0 から 0.6 に低下するにしたがって強震波形で 36.20 から 24.48 に、日道協の動解波形で 41.36 から 25.96 に低下しているのが認められる。したがって、経年劣化の特徴が構造モデルの固有振動数より高い振動数領域でフーリエスペクトルの比較では把握し難い経年劣化をウェーブレットスペクトルの比較よりある程度可能となるものと考えられる。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。

5. 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) ウェーブレットフーリエスペクトルから振動数が小さくなり、周期が長くなっていることが確認できる。
- 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。

謝辞：最後に、本研究に際して道路橋の耐震設計に関する情報をいただいた株式会社ニュージェック橋本欣也様、株式会社アイジェック石川博喜様および数値計算に協力いただいた大阪産業大学工学部学生大西祐哉君に深く感謝の意を表します。

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・構造物のヘルスマonitoring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.softevolution.jp/bs/femst14/FEM_勉強会\(H24.9\).pdf](http://femst.softevolution.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) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2012.
- 10) 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.
- 11) T., Iida, D., Lim, K., Kawano: Seismic Performance Evaluations of Bridge-Pier System under Aging Structural Properties, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, pp.1-10, 2012.
- 12) 荒川直士, 川島一彦: 動的解析用入力地震動の設定法, 土木研究所資料, 第2120号, 1984.

EXTRACTION OF THE AGING OF A ROCKING SDOF SYSTEM MODELING THE RC BRIDGE PIER BY USING THE WAVELET TRANSFORM

Norihiko YAMASHITA, Koki MAEGAWA, Kojiro MIYAWAKI, Mitsunori OHTA and Teruyuki MIURA

The aging of numerous infrastructures that were constructed during the high economic growth period of Japan constitutes one of the current social issues. Additionally, irregular external excitations, such as earthquakes, cause damage to the structures, it thereby decreasing the original performance of structures and leading to changes in their natural frequency and damping characteristic. If these changes can be detected, it will be possible to evaluate the degree of aging of the structure, and enable health monitoring. The Fourier transform is one of the methods to detect the damage to the structure. However, the damage is dependent on the characteristic of the wave pattern. Moreover, the provided frequency characteristic has a limitation in that information is dependent on the time history at all times. In this study, we constructed the earthquake resistant design in accordance to specifications for highway bridges (2012 edition) for a single RC bridge pier and presented the $M-\Phi$ relationship for a specific pier base to allow the description of the $M-\theta$ relationship of the rocking SDOF model. Furthermore, we carried out a non-linear response analysis and performed the characteristic extraction of the acceleration wave pattern using the discrete wavelet transform and the wavelet spectrum. We concurrently examined the bending moment and the angle of rotation in consideration of aging with regard to the $M-\theta$ relationship and the vertical axis and the horizontal axis was examined whether detectable changes in the earthquake resistance by multiplying n . As a result of these analyses, decomposition coefficients estimated from the maximum value of the wavelet coefficients is increased owing to aging, and the frequency is confirmed to be reduced.