RC 橋脚の経年劣化を考慮した１自由度系の変位とウェーブレット係数の増分に関する一考察

山下　典彦[1]・三浦　輝之[2]・甲田　啓太[3]・宮脇　幸治郎[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]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）
[4]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）

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，単柱矩形 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(近似，厳密(P-Δ効果を含む))の曲げモーメント - 回転角を共に n 倍と仮定することで経年劣化を考慮し，離散ウェーブレット変換により加速度応答波形の特徴抽出を行った．その際，ウェーブレット変換と経年劣化との関係を調べるために残留変位に着目し，変位及びウェーブレット係数の増分の相関性を検討した．

Key Words: *wavelet analysis, RC bridge pier, aging, rigorous rocking SDOF model, P-Δ effect*

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耐用年数期間内の経年劣化が社会問題となっている．それらを評価することは維持管理や更新を行う上で重要であるとともに，想定される大規模な地震に対して必要な耐震性能を把握する上で非常に重要である．

下脇ら [1]は実際の橋梁の各所に加速度センサを設置し，衝撃試験から得られた振動データをウェーブレット変換し，無傷状態と損傷状態を比較することによって橋梁の劣化診断の可能性を見出している．著者ら [2]は，経年劣化を考慮した単柱矩形 RC 橋脚を対象に回転１自由度系の非線形応答解析を行い，離散ウェーブレット変換 [3]による特徴抽出と，残留変位に着目した変位及びウェーブレット係数の増分の相関性について検討している．また，1 自由度系においては川島ら [4]が許容塑性率を議論するために，残留変位の定量化を試みている．

本研究では，回転１自由度系において微小変形を想定したモデル（以下，近似）と，大変形を想定し P-Δ 効果 [5]の影響を考慮することで残留変位を生じやすくさせたモデル（以下，厳密(P-Δ)）により非線形応答解析を行う．算出された絶対加速度波形を離散ウェーブレット変換することで得られるウェーブレット係数と変位の増分をパルス地震動 [6]ごとに検討し，そのパルス時の履歴ループを調べることで残留変位が生じるきっかけについて検討する．

2. RC 橋脚のモデル化

図-1 に示す単柱矩形 RC 橋脚(橋軸方向)はこれまでの解析 [2]のモデル 2 を使用し，躯体の材料パラメーターを**表-1** に示す．ここでは，「橋脚の設計（フォーラムエイト）」を用いて，柱高さを 50 分割し，各間隔の曲げモーメント曲率関係から柱基部で求められる M-φ関係を柱高さにより M-θ関係に置き換えることで，回転 1 自由度系の経過年数 0 年の復元曲げモーメントとする．そして，経年劣化の決定は，**図-2** に示すように耐用年数を 50 年とし，50 年後の降伏強度が指数関数にしたがって 40%低減すると仮定した．具体的に，降伏強度と降伏変位は共に劣化の影響を受けると考え，曲げモーメントと回転角を共に n 倍することで，10 年から 50 年の経年劣化を考慮した M-θ関係を**図-3** に示す．解析に用いる時間刻みは，入力地震動を非線形応答解析で 0.001s に

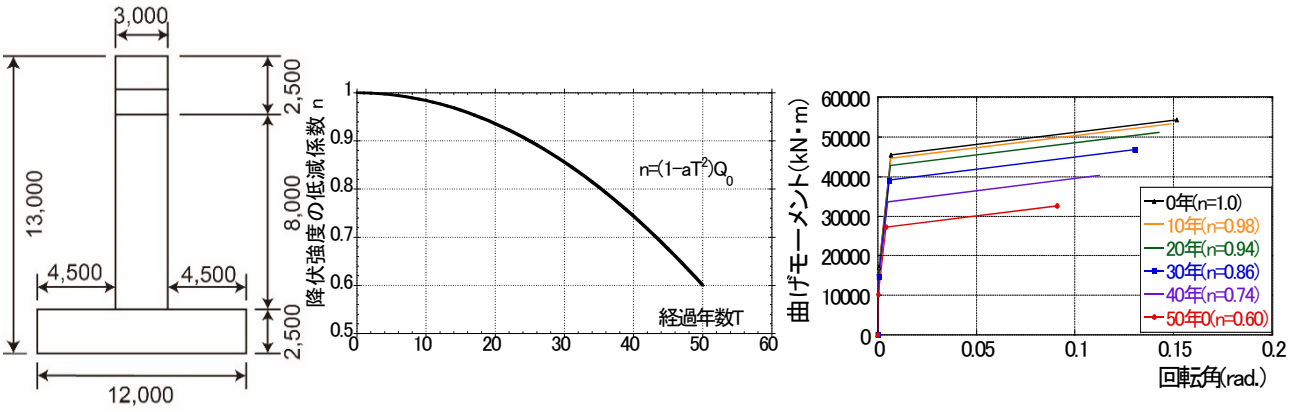


図-2　降伏強度の低減係数-経過年数関係　　図-3　M-θ 関係

表-1　躯体の材料パラメーター

コンクリートの強度	24.0(N/mm²)	鉄筋の断面補正係数	α=0.2, β=0.4
コンクリートのヤング係数	2.50×10⁴(N/mm²)	鉄筋の材質	SD345
鉄筋のヤング係数	2.00×10⁵(N/mm²)	死荷重反力	4000kN
鉄筋コンクリートの 単位体積重量	24.5(kN/m³)	橋軸方向の 慣性力作用位置	10.500mm

線形補間し，フーリエ解析及びウェーブレット解析ではほとんど結果に影響しないので 0.01s に合わせ，継続時間は高速フーリエ変換を用いているため 2 のべき乗のデータ数とした．応答解析では，増分法（β=1/6）で，減衰定数を 5%，復元力特性はトリリニア型を使用した．

3.　離散ウェーブレット変換について

図-4 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，基本振動数 df を解析波形の刻み時間 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．

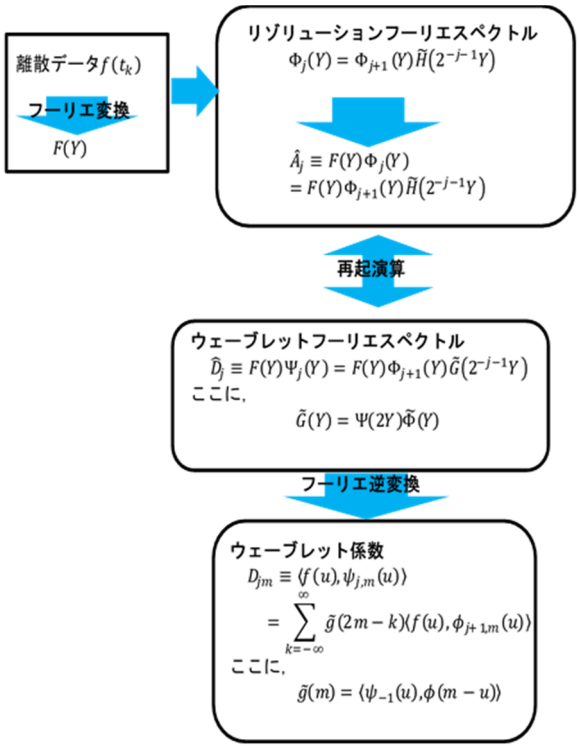


図-4　離散ウェーブレット変換のフロー

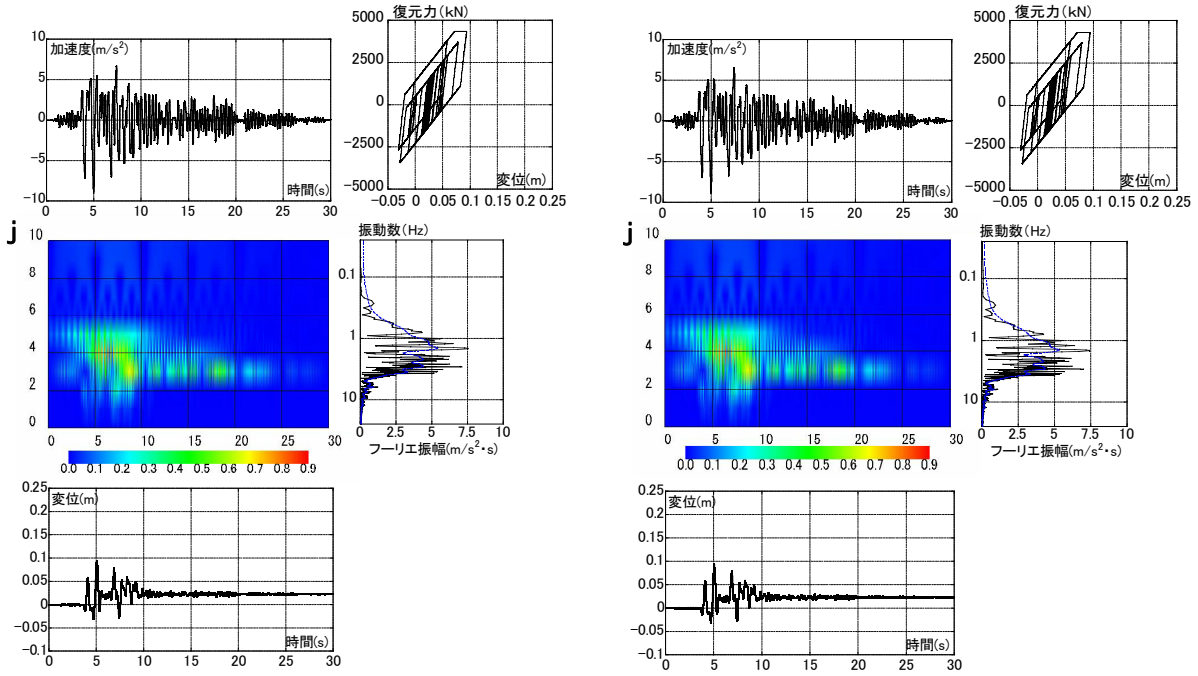
4.　解析結果

(1)　非線形応答解析

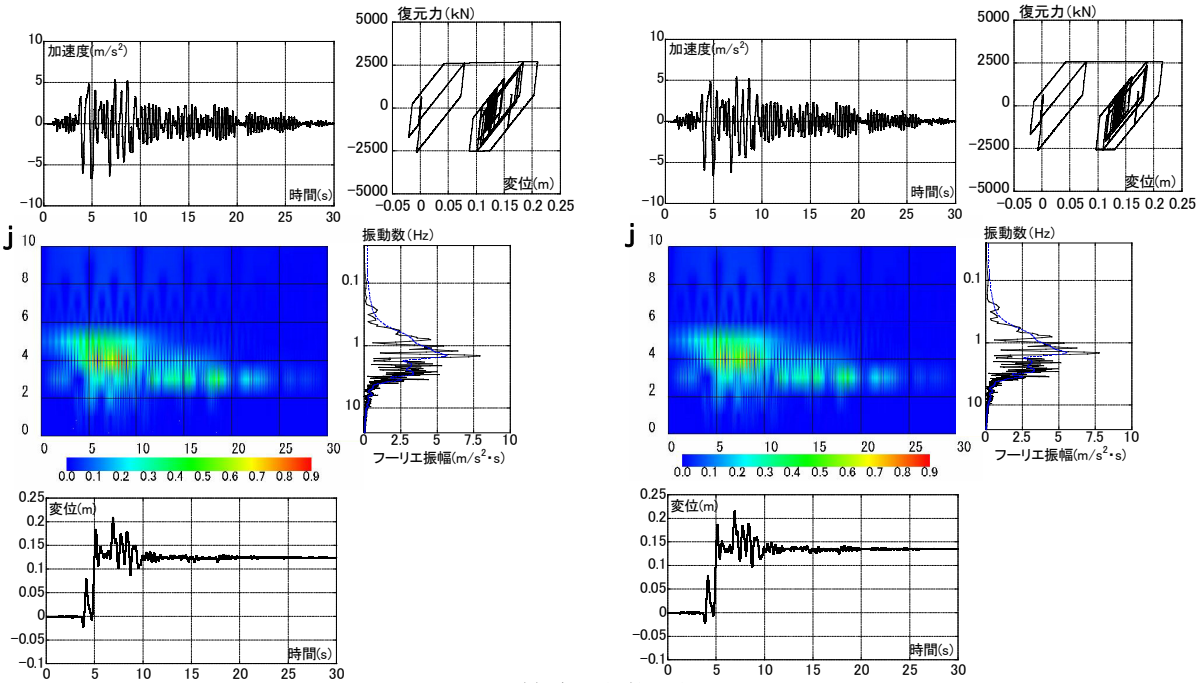
入力地震動は平成 7 年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録 NS 成分を用いた．図-5 に，経過年数 0 年及び 50 年での絶対加速度波形，履歴ループ，絶対加速度波形におけるウェーブレット変換及びフーリエスペク

トル，変位波形を示す．左側が近似，右側が厳密(P-Δ)でのそれぞれの結果である．**図-5** において，絶対加速度波形の最大値(m/s2)は，近似では経過年数 0 年で-9.05(4.96s)，50 年で-6.68(4.95s)，厳密(P-Δ)では経過年数 0 年で-8.91(4.96s)，50 年で-6.59(4.94s)となり，両者とも経年劣化により，経過年数 50 年では非線形化の影響を受け最大値が減少している．また，近似と厳密(P-Δ)で比較すると，後者は P-Δ 効果の影響を受けることにより剛性低下が生じ，加速度の最大値が低下していることが分かる．

M-θ 関係を復元力ー変位関係に置き換えた履歴ループから塑性率を算出すると，近似では経過年数 0 年で 1.31，50 年で 4.89，厳密(P-Δ)では経過年数 0 年で 1.32，50 年で 5.03 となり，両者とも経年劣化の影響を受け，経過年数 50 年の場合において塑性率が増加している．近似と厳密(P-Δ)で比較すると，経過年数 0 年では差はほとんど無いが 50 年では差が見られ，経年劣化による変形の増大が P-Δ 効果の影響を大きくしたと考えられる．



(a) 経過年数 0 年



(b) 経過年数 50 年

図-5 回転 1 自由度系の非線形応答解析結果（左：近似，右：厳密(P-Δ)）

残留変位(m)に着目すると近似では経過年数 0 年で 0.023，50 年で 0.125 であり，厳密(P-Δ)では経過年数 0 年で 0.023，50 年で 0.135 となり，経年劣化により残留変位が増大している．また，P-Δ 効果に着目すると，経過年数 0 年ではその影響は残留変位には表れておらず，50 年の場合では残留変位が大きくなっている．

ウェーブレット変換から，ウェーブレット係数(m/s2・s) の最大値は近似では経過年数 0 年で 0.87(j=4)，50 年で 0.85(j=4)となり，厳密(P-Δ)では経過年数 0 年で 0.84(j=4)，50 年で 0.84(j=4)であり，P-Δ 効果によって最大値が低下した．フーリエスペクトルから 5 点ピーク法により，求めた卓越振動数では近似及び厳密(P-Δ)ともに経過年数 0 年で 1.49(Hz)，50 年で 1.46(Hz)となり，経年劣化により卓越振動数が小さくなった．

続いて，分解係数 j=3 及び j=4 における，ウェーブレット係数を**図-6** に示す.ここで，最大値に着目すると，近似では経過年数 0 年で 0.77(j=3,t=9.12s)，0.87(j=4,t=6.08s)となり，50 年で 0.52(j=3,t=18.48s)，0.85(j=4,t=8.48s)であった．また，厳密(P-Δ)では経過年数 0 年で 0.74(j=3,t=9.12s)，0.84(j=4.t=6.08s) となり，50 年で 0.52(j=3,t=18.48s)，0.84(j=4,t=8.16s)となり，j=4 では経過年数によるウェーブレット係数の最大値に近似及び厳密(P-Δ)ともに影響は少なかったが，j=3 では低減が見られる結果となった．

(2) 変位及びウェーブレット係数の増分について

本検討では，変位及びウェーブレット係数の増分から残留変位が生じるきっかけについてパルス地震動 [5]を参考に，**図-7** の中から，2，5，6，14，17 のパルスを使用して検討を行う．ここで**図-8** に近似と厳密(P-Δ)における経過年数ごとの変位波形を示す．**図-8** より，残留変位が大きく生じているのは経過年数 40 年と 50 年であり，0 年から 20 年までは残留変位が小さいことが確認できる．そこでウェーブレット係数(j=3)及び変位の増分では，残留変位の大きい 50 年と残留変位の小さい 20 年の経過年数を縦軸に，0 年を横軸にとりパルスごとにプロットし同時にその履歴ループを**図-9** に示す．また，**図-9** の履歴ループではデータ数 100 個ごとにマーカーをプロットしている．

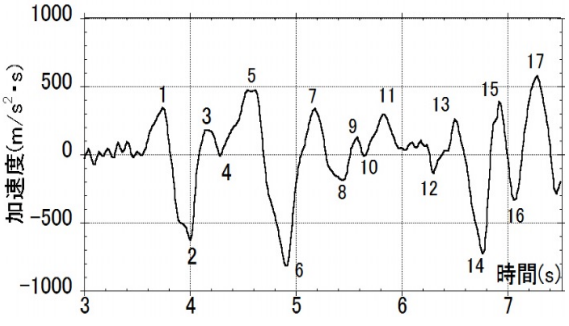
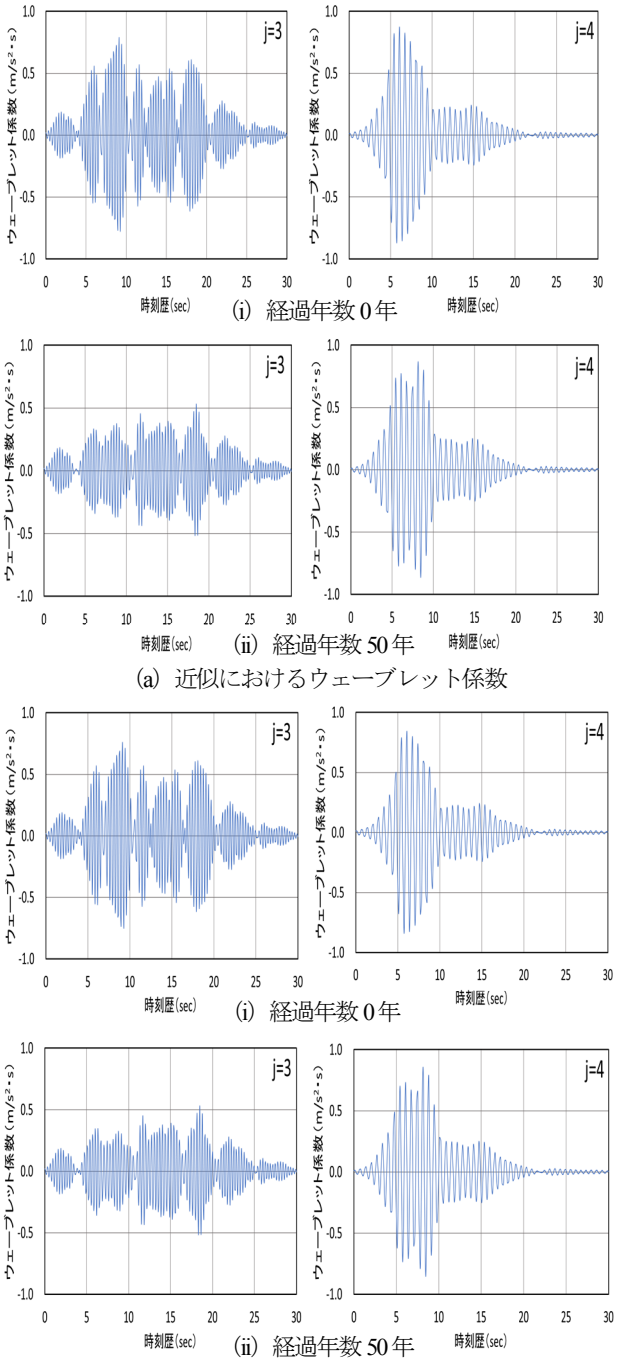


図-7 パルス地震動



(i) 経過年数 0 年　(ii) 経過年数 50 年

(a) 近似におけるウェーブレット係数

(i) 経過年数 0 年　(ii) 経過年数 50 年

(b) 厳密(P-Δ)におけるウェーブレット係数

図-6 分解係数ごとのウェーブレット係数

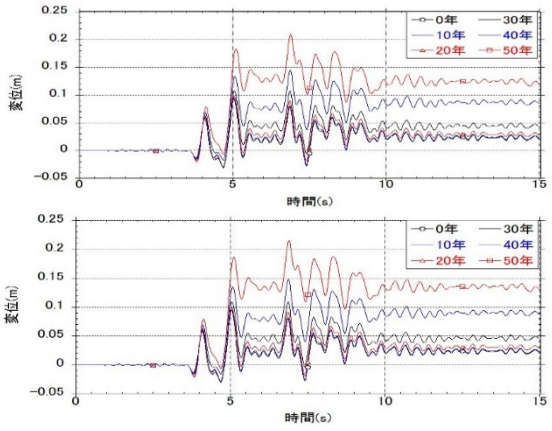
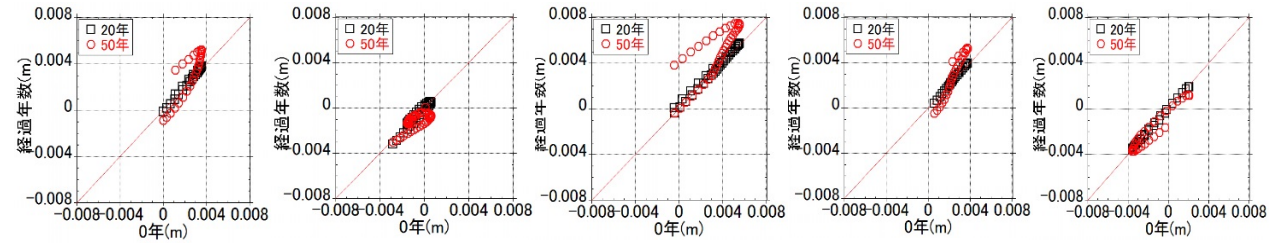
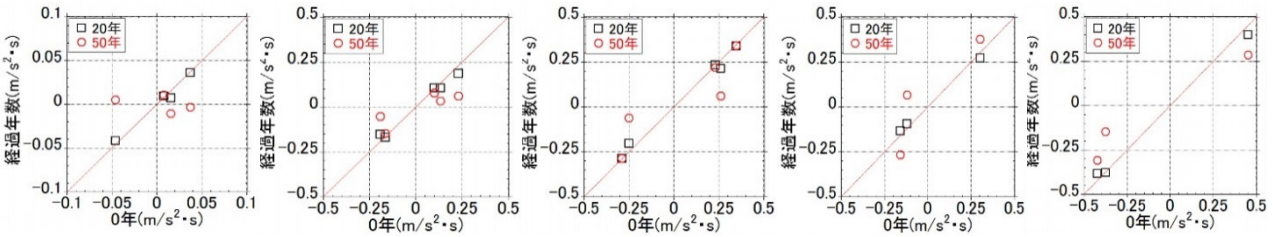


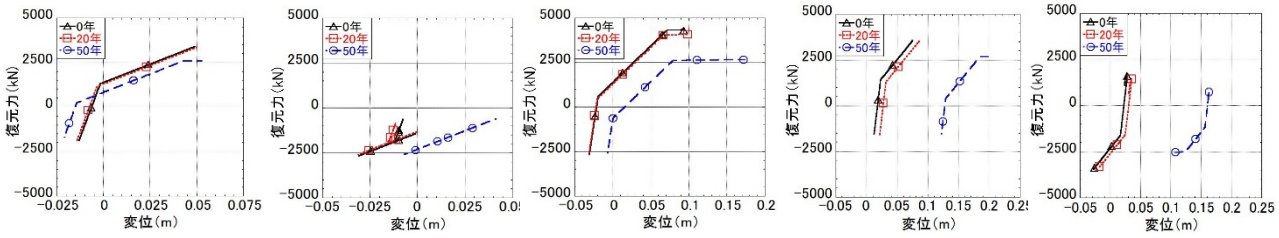
図-8 変位波形（上段：近似，下段：厳密(P-Δ)）



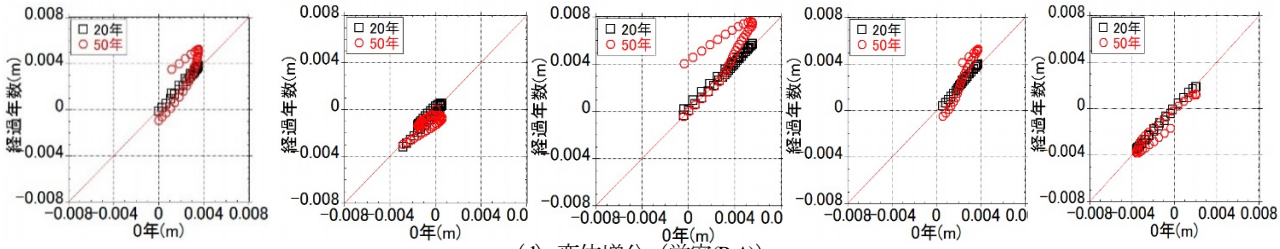
(a) 変位増分（近似）



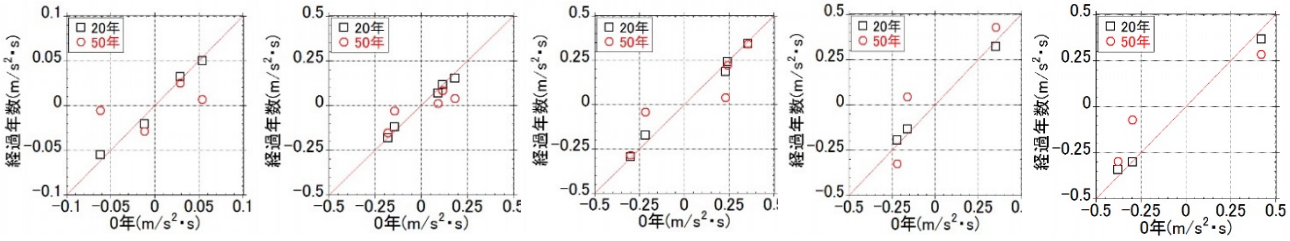
(b) ウェーブレット係数の増分（近似）



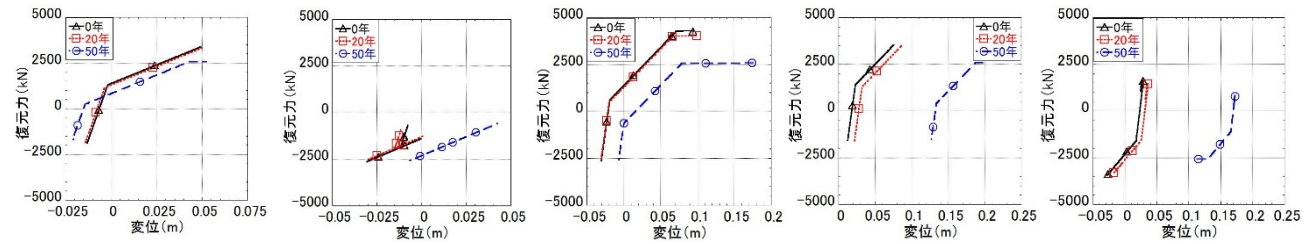
(c) 履歴ループ（近似）



(d) 変位増分（厳密(P-Δ)）



(e) ウェーブレット係数の増分（厳密(P-Δ)）



(f) 履歴ループ（厳密(P-Δ)）

(i) パルス 2　(ii) パルス 5　(iii) パルス 6　(iv) パルス 14　(v) パルス 17

図-9 パルスごとの経過年数の違い

図-9 より，パルス 5，14，17 において，変位増分において，あまりばらつきが見られないが，パルス 2，6 に関しては，ばらつきが大きくなっている．パルス 5，14，17 では，履歴ループにおけるマーカーの位置より，経過年数ごとに，復元力に大きな差が存在していないため，応答に与える影響が少ないことが読み取れる．

また，パルス 2 に関しては，履歴ループにおいて，経過年数 0 年と 20 年では復元力にはあまり差が認められないが，50 年においては降伏レベルの低下により，第 3 勾配に移行しており，それ以降の復元力には差が見られるため，応答に影響をおよぼしていると考えられる．

パルス 6 に関しては，経過年数に関係なく，履歴ループにおいて，第 3 勾配に移行しているが，経過年数 50 年の履歴は他のものと比較して第 3 勾配に入るのが早く，それ以降で他の年数のものと比較して，復元力及び変位の差が大きく生じていることが分かる．

また，パルス 2，6 においてはその他のパルスと比較して，履歴ループのマーカーの間隔が大きく，応答に与える影響が大きいことが読み取れる．したがって，各パルスごとに構造物に与える影響には大きな差が存在していることがわかる．

5. まとめ

単中矩形 RC 橋脚を対象として，道路橋示方書耐震設計編(H24 年版)で耐震設計を行うことでモデルを設定し，近似モデルと厳密(P-Δ)大変形を想定し回転 1 自由度系を用いて離散ウェーブレット変換より加速度応答波形の特徴抽出を行った．そして，変位及びウェーブレット係数の増分と履歴ループから残留変位が生じるきっかけについて検討した．それらの結果をまとめると以下の通りである．

1) 年数が経過することにより，履歴ループに降伏が生じやすく塑性化が早くなるため，ウェーブレット係数の最大値が生じる時刻が変化する
2) ウェーブレット係数の増分を地震動パルスごとで詳細に検討することによって，パルスごとに応答に広がりが生まれ，増分変位のばらつきが変化するため．地震動の観点から残留変位のきっかけを特定できる可能性がある．

謝辞：本論文の執筆の際にご助言を頂きました大阪産業大学大学院工学研究科前川広基さんに深く感謝の意を表します．

参考文献

1) 下脇僚太，犬島浩，大貝晴俊，丸山泉，永田伸二：ウェーブレット変換を用いた橋梁の劣化診断，電子情報通信学会電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集,第67回連合大会(平成26年度)，p.150,2014.
2) 山下典彦，前川広基，宮脇幸治郎，太田充紀，三浦輝之：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，土木学会地震工学論文集 Vol．35.(2016.2.20 受理)
3) 宮脇幸治郎，土岐憲三：ウェ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,
4) 川島一彦，Gregory A.MACRAE，星隈順一，長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集 No.501/I-29，pp.183~192，1994.
5) 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及ぼす影響，土木学会地震工学論文集 CD-ROM，pp,1-8，2003
6) 堺淳一，川島一彦：パルス応答スペクトルに基づく断層直下地震動の特性，土木学会 構造工学論文集，Vol.45A，1999

A STUDY OF INCREMENT OF DISPLACEMENT AND WAVELET COEFFICIENT OF SDOF SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT AGING DEGRADATION OF RC BRIDGE PIER

Norihiko YAMASHITA, Teruyuki MIURA, Keita KODA and Kojiro MIYAWAKI

The aging of numerous infrastructures that were constructed during the high economic growth period of Japan constitutes one of the current social issues. In this study, we constructed the earthquake re-sistant design in accordance to specifications for highway bridges (2012 edition) for a single RC bridge pier and presented the M-Φ relationship for a specific pier base to allow the description of the M-θ rela-tionship of the rocking SDOF model (approximate and rigorous(include P-Δ effect)). Furthermore, we have carried out nonlinear response analysis and performed the characteristic extraction of the accelera-tion wave pattern using the discrete wavelet transform. At this time, we are focusing on the residual dis-placement to examine the relationship between wavelet transform and aging degradation was examined the correlation increments of displacement and wavelet coefficient.