

RC橋脚の経年変化を考慮した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・前川広基²・宮脇幸治郎³

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）

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に生じるさまざまな要因による経年劣化が社会問題の1つとなっている。それらを評価することは長寿命化を意識した維持管理だけでなく、想定された巨大地震に対して必要な耐震性能を把握する上で重要である。また、それらの状況を迅速に把握できる省力化されたシステムの開発が望まれる。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。また著者ら²⁾は単柱矩形RC橋脚を対象に回転1自由度系の非線形地震応答解析を行い、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。

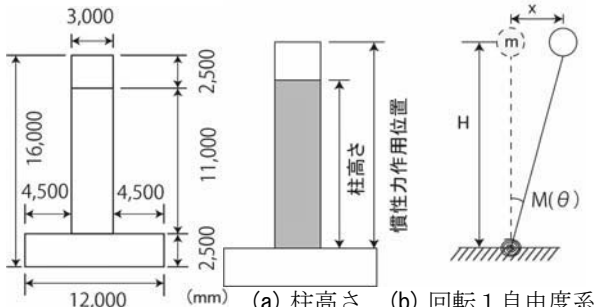


図-1 RC 橋脚

図-2 柱基部での復元モーメント

本研究では、これまでウェーブレット係数の絶対値を解析²⁾に用いてきたが、ここでは絶対値の有無による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する。さらに、それらの増分と履歴ループを1秒間隔で調べることで、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1を使用し、躯体の材料パラメータを表-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、図-2(a)に示す柱高さを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M-θ関係を図-2(b)の回転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-3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-4に示す。解析に用いる時間刻みは、入力地震動を時刻歴応答解析で0.001sに線形補間し、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。時刻歴応

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/mm ²)	鉄筋の断面補正係数	$\alpha=0.2, \beta=0.4$
コンクリートのヤング係数	2.50×10^4 (N/mm ²)	鉄筋の材質	SD345
鉄筋のヤング係数	2.00×10^5 (N/mm ²)	死荷重反力	4000kN
鉄筋コンクリートの 単位体積重量	24.5(kN/m ³)	橋軸方向の 慣性力作用位置	13,500mm

答解析は増分法（ $\beta = 1/6$ ）で減衰定数5%，骨格曲線はトリリニア型とした。

3. 解析結果

(1) 回転1自由度系応答解析

入力地震動はこれまでの解析²⁾の日道の神戸NS成分を用いる。ここでは、経過年数0年と50年の回転1自由度系の絶対加速度波形，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及び変位波形を示し，左側が0年，右側が50年である。

図-5 に示す絶対加速度波形の最大値(m/s^2)は，経過年数0年で-8.13(5.64s)，50年で-7.02(5.58s)となり，最大加速度が非線形応答の影響で経過年数50年の場

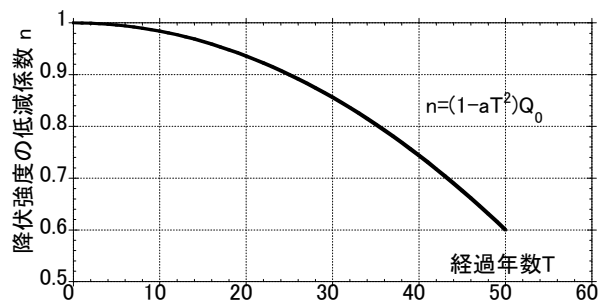


図-3 降伏強度の低減係数-経過年数関係

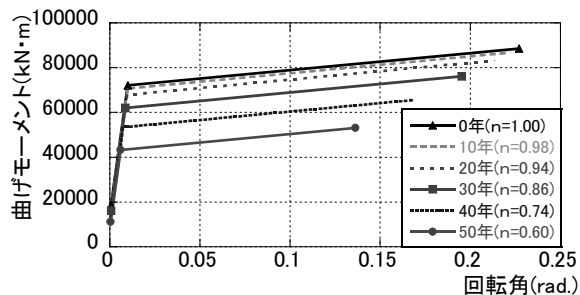
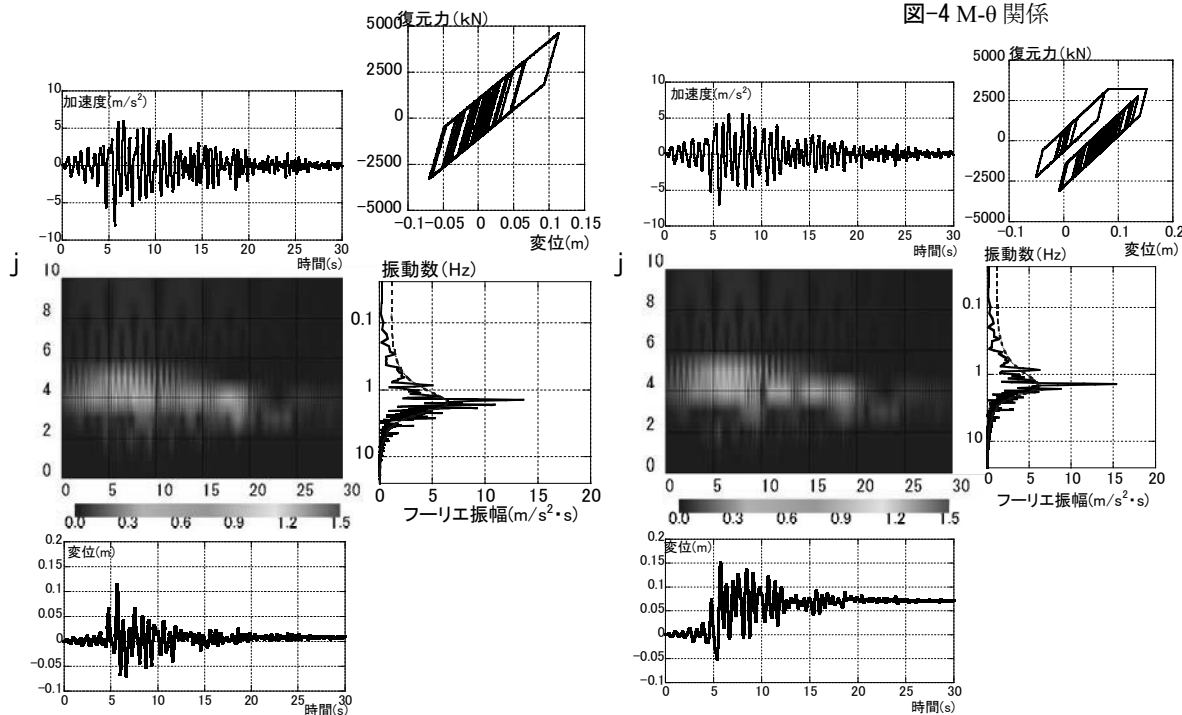


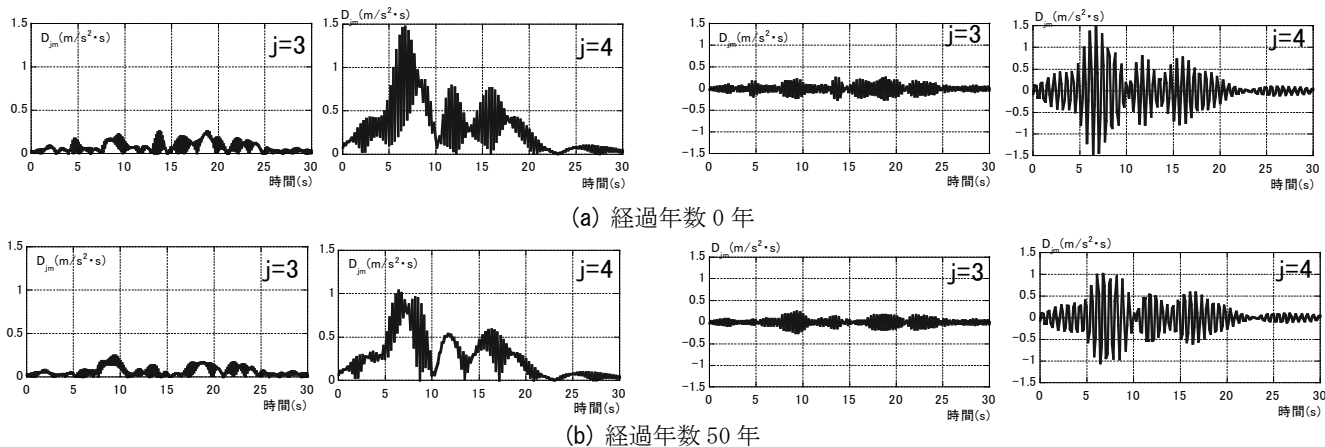
図-4 M- θ 関係



(a) 経過年数0年

(b) 経過年数50年

図-5 回転1自由度系の応答解析結果



(a) 経過年数0年

(b) 経過年数50年

図-6 ウェーブレット係数(右：絶対値有，左：絶対値無)

合に小さくなっていることが読み取れる。M- θ 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、経過年数 0 年で 0.81, 50 年で 1.84 となり、経過年数 50 年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($\text{m/s}^2 \cdot \text{s}$)の最大値は経過年数 0 年で 1.47($j=4$), 50 年で 1.04($j=4$)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、経過年数 0 年で 1.54, 50 年で 1.44 となり経年劣化により卓越振動数が小さくなった。変位波形から残留変位(m)は経過年

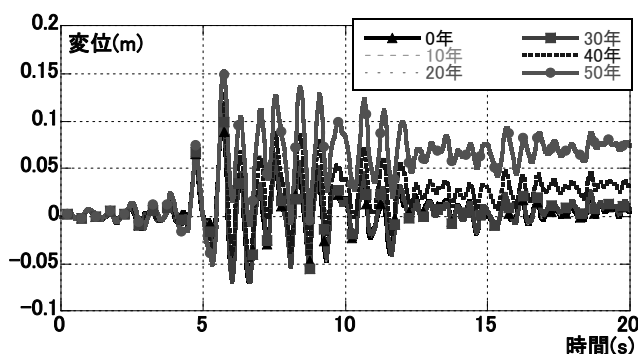


図-7 各年数の変位

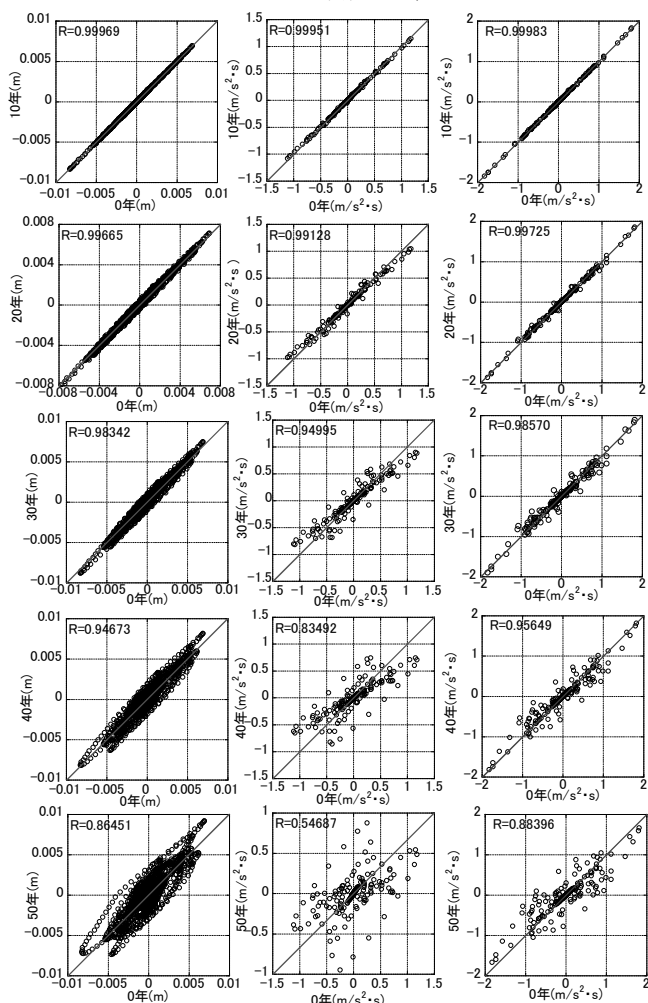


図-8 各年数の増分

(左:変位, 中:ウェーブレット係数の絶対値有, 右:ウェーブレット係数の絶対値無)

数 0 年で 0.008, 50 年で 0.070 となり経年劣化により残留変位が大きく, 8.8 倍となった。

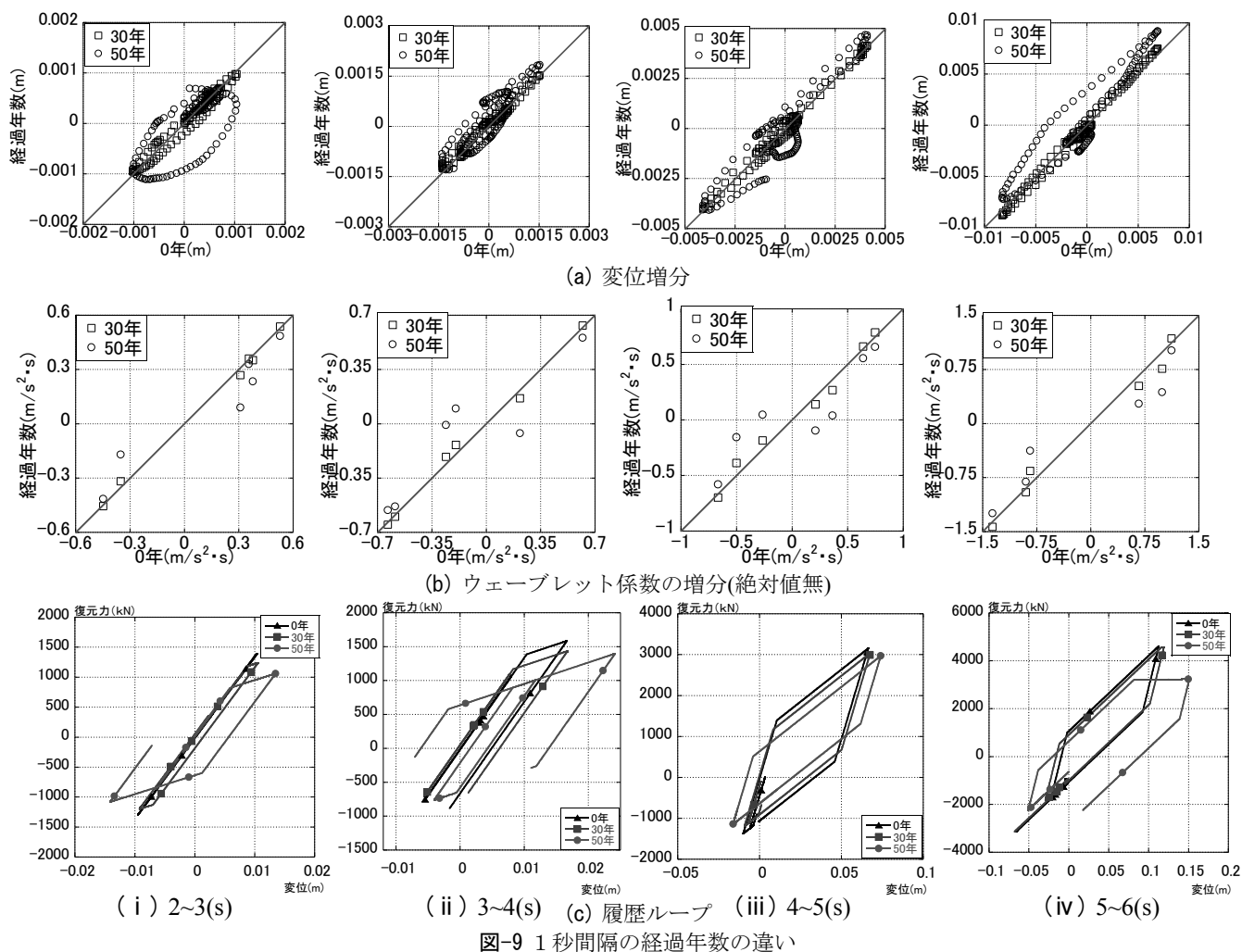
図-6 に図-5 でウェーブレット係数の最大値が大きい分解係数 3,4 のウェーブレット係数を絶対値の有無ごとに示す。ウェーブレット係数($\text{m/s}^2 \cdot \text{s}$)の最大値は絶対値の有無に関係なく経過年数 0 年で 0.26($j=3, t=18.88\text{s}$), 1.47($j=4, t=6.72\text{s}$), 50 年で絶対値有では 0.25 ($j=3, t=9.36\text{s}$), 1.04 ($j=4, t=6.40\text{s}$), 絶対値無で 0.25 ($j=3, t=9.36\text{s}$), -1.04 ($j=4, t=6.40\text{s}$) となっている。分解係数ごとの最大値の生じる時刻が変動している要因は、経年劣化による降伏レベルの低下した復元力特性の変化によるものと推測される。すなわち、年数が経過する際、最大値の生じる時刻が早く表れているのは、低下した降伏レベルに早く達し、その後の最大値を示す時刻も早く達した結果と推測され、ウェーブレット係数により時刻的な抽出がなされているものと思われる。

(2) 変位及びウェーブレット係数の増分

本検討では、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、変位増分及びウェーブレット係数($j=4$)の絶対値の有無による増分の相関性を検討する。

図-7 に経過年数ごとの変位を示す。残留変位が大きく生じている経過年数は 40 年と 50 年であり、0 年から 30 年のときの変位波形はほぼ重なっていることが確認できる。図-8 に横軸を 0 年として縦軸にそれぞれの経過年数ごとにプロットしたものを左側から変位増分、ウェーブレット係数の絶対値有の増分、ウェーブレット係数の絶対値無の増分の順に示す。各増分共に 0 年から 30 年は相関があることが確認でき、40 年からはばらつきが大きくなっている。変動係数 R は、年数が経過することで変位増分、ウェーブレット係数の増分で小さくなり、ウェーブレット係数の絶対値の有無による変位増分との相関性は、変動係数から絶対値無の場合がより高い相関性を持っている。

そこで、変位増分と相関性のあるウェーブレット係数絶対値無の増分から残留変位が生じるきっかけを探すために、残留変位が無い 30 年と残留変位が大きい 50 年の経過年数を縦軸、0 年を横軸に 1 秒間隔でプロットしたものを図-9(a) 及び(b)に示す。2~5 s からは、変位とウェーブレット係数の増分共にばらつきが確認できないが、変位の最大値のある 5~6 s 間ではばらつきが大きくなっている。図-9(c)に図-9(a), (b)の区間の履歴ループをデータ数が 200 個ごとにマーカーをプロットした。2~3s で 30 年, 50 年



が第2勾配に移行しているが、マーカーの位置から復元力の差が小さいので応答に与える影響が少ない。しかし、5~6sでは、0年と30年は履歴ループの第2勾配に移行していることが確認でき、復元力に差があまり認められない。一方、50年は降伏レベルの低下により履歴ループの第3勾配に移行して、復元力に差が大きく生じ、変位も大きく生じている。さらに、履歴ループのマーカー位置から変位や復元力の最大値を示す時刻も変動していることがわかり、0年、30年、50年の順に早く最大値を示しているのが読み取れ、これらの変化が変位やウェーブレット係数の増分特性にも影響すると推測される。したがって、経年劣化による残留変位が生じるきっかけが検出できる可能性がある。

4. まとめ

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)で耐震設計を行うことでモデルを設定し、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、変位増分とウェーブレット係数の絶対値の有無

による増分の相関と履歴ループから経年劣化による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るため、ウェーブレット係数の最大値が生じる時刻が早くなると考えられる。
- 2) 変位及びウェーブレット係数の絶対値の有無の増分の相関性から、絶対値無の場合の相関性が高い。
- 3) ウェーブレット係数の増分を1秒間隔で詳細に検討することによって、年数が経過するとばらつきが確認できることから経年劣化による残留変位のきっかけが検出できる可能性がある。

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.