加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研究

1 質点系構造物の場合

STUDY OF A NEW METHOD TO COMPUTE THE PERFORMANCE CURVE
OF REAL STRUCTURES WITH ACCELERATION SENSORS

In the case of SDOF system structures

川村 学*, 楠 浩一**, 山下美帆***, 服部勇樹***

日向大樹***, ミゲール ディアス****, 田才 晃*****

*Manabu KAWAMURA, Koichi KUSUNOKI, Miho YAMASHITA,
Yuki HATTORI, Daiki HINATA, Miguel Augusto DIAZ FIGUEROA
and Akira TASAI*

This paper shows a new method of the double integral with *Wavelet Transformation* to compute the response displacement of the building from the measured acceleration. This method provides the performance curve of the building that suffered an earthquake and enables us to judge the damage of the building quickly after the earthquake. We discussed the usefulness of this new method through the past experimental data of the shaking table test of R/C columns in this paper.

Keywords : *Quick Inspection, Measurement of Acceleration, Double Integration,
Performance Curve, Wavelet Transformation, Shaking Table Test*

応急危険度判定, 加速度計測, 2階積分, 性能曲線, ウェーブレット変換, 振動台実験

1. はじめに

本報は地震を受けた鉄筋コンクリート造建物に対する新しい被災
度判定手法の確立を目的に、実構造物に設置した加速度計の計測記
録から地震を受けた構造物の性能曲線を算出する方法を提案し、既
往の鉄筋コンクリート造柱の振動台実験記録¹⁾を用いてその有用性
を検討するものである。ここで、性能曲線とは構造物の等価荷重—
等価応答変位関係の骨格曲線を指し、荷重は絶対加速度、変位は基
礎からの相対変位とする。本手法の特徴はこの相対変位を加速度の
2階積分により求める点にある。

近年では加速度計の小型軽量化が進んでおり、本手法の確立によ
って平常時の建物の使用性は損ねることなく、地震時には建物の被
災度を性能曲線から迅速かつ定量的に判定することが可能となれば、
より適切な避難誘導や救助活動等にも大いに貢献が期待できる。

加速度計を用いた建築物の健全性を評価する為の構造モニタリン
グ評価に関する研究は、近年では数多く行われている^{例えば 2)~7)}。

損傷評価の手法としては主に、固有円振動数や刺激係数などのモ
ード特性を同定した上でそれらの変化により損傷の有無や程度を推
定するもの^{例えば 2)~5)}と、層剛性等の物理特性を直接同定するもの<sup>例え
ば 6), 7)</sup>の2つに大別される。

モード特性を同定して用いる手法では、主としてホワイトノイズ
入力による常時微動の計測値が用いられ、必ずしも全層の応答計測
を行わなくても損傷の有無の把握が可能であるものが多い。ただし、
損傷個所の特定や損傷程度の評価等のより詳細な構造ヘルスマニ
タリングを行うには、より多くの層における加速度応答計測もしくは
高次モードの同定を行い、同定したモード特性から層剛性等の物理
特性を求める必要がある^{2), 3)}。また、濱本らは偏心を有する多層建
築物を対象に、常時微動だけでなく小型加振機による下部加振と上
部加振を併用して低次と高次のモードを励起し、両モード特性を用
いた損傷同定を行うことにより損傷検出精度を向上させることが可
能であることを示した^{4), 5)}。

* 大成建設設計本部

** 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院
准教授・博士(工学)*** 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府
博士課程前期

**** 横浜国立大学大学院工学府 博士課程後期

***** 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院
教授・博士(工学)

Dept. of Design, TAISEI CORPORATION

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Urban Innovation, Graduate School of
Yokohama National University, Dr. Eng.Student, Dept. of Architecture, Faculty of Urban Innovation, Graduate School of Yokohama
National UniversityStudent, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Graduate School of Yokohama
National UniversityProf., Dept. of Architecture, Faculty of Urban Innovation, Graduate School of Yokohama
National University, Dr. Eng.

物理特性を直接同定して用いる手法では、層ごとの損傷の評価にそのまま結び付けることが可能であるが、全層もしくは構造ヘルスマニタリングの対象層より上層の同期された加速度応答計測等、多数点の観測情報を必要としている場合が多い^{6) 7)}。それに対し、対象層の上下層における観測値から各層独立に層剛性等の物理特性を直接同定する手法も提案されている。仁田らは、対象層とその上下層の絶対応答加速度のみで層剛性の剛性低下率を把握できる、加速度計測による層剛性の構造ヘルスマニタリング手法を提案し、その有効性を数値解析および小型構造物模型によるホワイトノイズを入力した振動台実験により検討している⁶⁾。また、中村らは、加速度応答をフーリエ変換し周波数領域上で同定を行い、振動数ゼロの極限值により構造ヘルスマニタリングを行う手法を提案し、数値シミュレーションならびに地震観測記録への適用によりその妥当性を検討している⁷⁾。

また、加速度計以外にも、例えば、中村らは兵庫県南部地震で構造被害を被った鉄骨造建物における被害補修前後の速度計を用いた常時微動計測に基づく層損傷評価を行い、計測結果から層動特性を評価する方法を提示している⁸⁾。

一方、楠らによる文献 10)~23)では、地震発生時に、既存構造物に設置した加速度計から観測された加速度記録から、構造物の復元力特性である性能曲線と、その地震による応答スペクトルの特性である要求曲線を計算し、両者を比較することにより、構造物の本震後の余震に対する安全性を自動的に判定する手法が提案されている。建物をあらかじめモデル化する必要もなく、建物の性能曲線を計測するため、等価剛性の変化(周期の変化)のみならず、強度の情報も得られる上、処理に工学的判断が基本的に不要で自動化が容易である点が、他の手法と大きく異なる。本報で提案する加速度の2階積分手法も、計測加速度から性能曲線を算出する際に使用することを対象としている。

1.1 加速度の2階積分による変位の算出

加速度の2階積分により変位を算出するためには、加速度記録の零基線ずれ等、2階積分によってその影響が飛躍的に増大する計測誤差を除去する必要がある⁹⁾。計測誤差の除去方法に関する既往の研究については文献 9)に詳しいが、それらの多くは比較的長周期の誤差成分についての周波数領域におけるフィルター処理に関する研究であり、フィルターを実施する際の境界振動数の決定が困難となる場合が多い⁹⁾。そこで文献 9)では Iwan の数値積分法^{9) 20)}における長周期の誤差成分に対し、建物の卓越振動数に着目しバンドパスフィルターを実施する際の境界振動数を決定する手法が提案され、それにより精度の良い変位波形の算出が可能であることが示された。ただし、卓越する周期がランダムに複数存在する地動加速度等については提案手法が適当でない場合があるという指摘がなされた⁹⁾。

文献 9)および文献 9)において参照された既往研究における誤差の除去方法に共通する特徴として、フーリエ変換を用いた周波数解析によって長周期成分の検出と除去を試みるという点が挙げられる。フィルター処理を施す周波数特性は、フーリエ変換を実施した時間では一義的であり、時間領域での変化を考慮することは一般的に難しい。また、応答特性ごとに、バンドパスフィルターの境界周波数やそのフィルターカットに用いる関数を検討する必要がある。本判

定手法は機械的かつ定量的に判定が行える手法の確立を目指しているため、なるべく技術者が個別に判断するプロセスを排除できる方法の採用が望ましい。一方、元の加速度計測記録を時間軸領域での周波数特性の変化を維持したまま、異なる複数の周波数帯の成分に分解することができれば、時間軸での振動数特性の変化に対応し、かつ周波数帯ごとに積分を行うことが可能となり、フーリエ変換を用いた周波数領域でのフィルターカットの周期や関数を個別に判断することなく、誤差の要因となる長周期成分の検出と除去が可能になると考えられる。

そこで本報ではウェーブレット変換を用いた時間周波数解析により、計測加速度の時刻歴波形を維持したまま複数の周波数帯への分解を行い、積分誤差の原因となる長周期成分の検出と除去を行う手法^{16)~23)}を提案する。また、本手法を既往の RC 造柱の振動台実験記録¹⁾において計測された加速度記録に適用し、同実験¹⁾において計測された変位波形との比較により手法の有用性を検討する。

2. 絶対加速度の算出

本報では1質点系モデルに置換可能な試験体による実験結果¹⁾を用いて検討を行うため、性能曲線縦軸の絶対加速度は頂部の加速度計測記録をそのまま用いることができる。基線補正については、既往の論文に倣い⁹⁾、計測の最初から 10cm/s^2 を超えない範囲を主要な振動が始まる前の微動と仮定し、微動の平均値を全体から減じることとする。

3. 水平変位の算出

性能曲線横軸の相対変位は、基礎および頂部の加速度計測記録の2階積分により算出する。積分前の加速度については絶対加速度の算出と同様の基線補正を行う。

3.1 加速度の2階積分による変位の算出

図1に4節に後述する既往の1層RC柱の振動台実験¹⁾の際に計測された柱頂部および脚部の加速度波形、およびその台形積分により求めた相対変位波形と計測変位波形との比較を示す。このように通常の台形積分では、微動部分の零基線ずれを考慮したにも関わらず、長周期成分の誤差の影響で変位が発散する。

そこで本研究ではウェーブレット変換を用いた時間周波数解析によって異なる周波数帯の加速度時刻歴波形に分解した後に台形積分を行い、長周期成分の検出と除去を行う。以下にウェーブレット変換の概要を示す。

図1 台形積分による加速度の2階積分

3.2 ウェーブレット変換の概要 16)~23), 24), 25)

ウェーブレット変換とは、ある規定するマザーウェーブレットに対して、信号 $f_{(x)}$ が如何に似通っているかを数学的に示すものであり、時間周波数解析手法の 1 つである。フーリエ変換との主な違いは、標準的なフーリエ変換は周波数成分だけで信号を評価するが、ウェーブレット変換は時間と周波数の両方の成分で信号を評価することである。N 個のデータを含むある信号 f_0 は、ウェーブレット変換により式(1)に示すように、ある周波数帯の信号のみを含む要素 g_{-1} と残りの信号 f_{-1} に分解される。

$$f_0 = g_{-1} + f_{-1} \quad \text{式 (1)}$$

変換された g_{-1} および f_{-1} は、N/2 個のデータを持つ。この変換を繰り返すことにより、信号 f_0 は、

$$f_0 = g_{-1} + g_{-2} + g_{-3} + \cdots g_{-n} + f_{-n} \quad \text{式 (2)}$$

のように分解できる。この時、

$$n = \log_2 N \quad \text{式 (3)}$$

であり、 f_{-n} は定数値となる。分解された信号は、数学的にその直交性が保証されている²⁴⁾。また、 g_i および f_i は、それぞれ式(4)および式(5)で計算できる。

$$g_j = \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad \text{式 (4)}$$

$$f_j = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^j x - k) \quad \text{式 (5)}$$

(a) Scaling

(b) マザーウェーブレット

図2 4階の B-Spline 関数の Scaling とマザーウェーブレット

ここで、 $d_k^{(j)}$: g_i を計算するための数列、 $c_k^{(j)}$: f_i を計算するための数列、 $\psi(x)$: マザーウェーブレット、 $\phi(x)$: Scaling、である。

ウェーブレット変換を用いた分解アルゴリズムは、式(6)および式(7)で、再構成アルゴリズムは式(8)で示される。なお、式中の g_k 、 h_k 、 p_k 、 q_k はいずれもマザーウェーブレットに依存して一義的に決定される数列である。

$$c_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_{\ell} g_{2k-\ell} c_k^{(j)} \quad \text{式 (6)}$$

$$d_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_{\ell} h_{2k-\ell} c_k^{(j)} \quad \text{式 (7)}$$

$$c_k^{(j)} = \sum_{\ell} (p_{2k-\ell} c_k^{(j-1)} + q_{2k-\ell} d_k^{(j-1)}) \quad \text{式 (8)}$$

ウェーブレット変換は、入力信号に合致するようなウェーブレット波形の拡大縮小 (スケーリング)・平行移動 (シフト) により行われる。効率性を考えると、マザーウェーブレットはコンパクトサポートの連続微分可能関数であることが望ましい。マザーウェーブレットの選択は、対象とする信号の特性を考慮して実施される必要がある。ここでは、もっとも対称性がよく、正弦関数に近い形を持つ 4 階の B-Spline 関数を選択した。図 2(a) および(b)に使用した Scaling 関数およびマザーウェーブレットを示す。また、信号 $f_{(x)}$ から、ランク 0 の $c_k^{(0)}$ を算出する際には、式(9)を用いて計算する。ここで、 $\beta_{\ell+m/2-k}^{(m)}$ は係数数列で、m は Spline 関数の次数(ここでは 4)を示す。

$$c_{\ell}^{(0)} = \sum_k f_{(k)} \beta_{\ell+m/2-k}^{(m)} \quad \text{式 (9)}$$

実際には、 $\beta_{\ell+m/2-k}^{(m)}$ 、 g_k 、 h_k は無限数列となる。そこで、 $\beta_{\ell+m/2-k}^{(m)}$ としては 10 要素、 g_k 、 h_k としては 18 要素を採用し、それ以外は 0 と仮定した。なお、この程度の要素を考慮すれば、十分な精度を有する分解が可能であることが知られている²⁴⁾。

ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットをウィンドウとして用いた時間周波数解析と考えることができる。時間軸上のウィンドウの幅 $2\Delta_f$ と周波数軸上の幅 $2\Delta_f$ の間には、数学的に式(10)に示す不確定性関係がある。

$$2\Delta_f \cdot 2\Delta_f \geq 2 \quad \text{式 (10)}$$

よって、 $f_{(x)}$ の時間刻みを Δ_t とすると、 i ランクでの g_i の時間刻み $\Delta_{t,i}$ は

$$\Delta_{t,i} = \Delta_t \times 2^i \quad \text{式 (11)}$$

となる。従って、 i ランクの g_i のナイキスト周波数 $\Delta_{f,i}$ は

$$\Delta_{f,i} = \frac{1}{2\Delta_t} \times 2^{i-1} \quad \text{式 (12)}$$

となる。つまり、ウェーブレット変換は数学的に不確定性関係を最小で満足するように時間刻みと振動数刻みが決定する時間周波数解析の 1 つと言える。本研究ではこのウェーブレット変換を用いて計測された加速度記録を、時刻歴波形を維持したままデータ数に応じて異なる複数の周波数帯の波形に分解し積分を行う。

3.3 ウェーブレット変換を用いた2階積分法

図3(a)および(b)に、図1に示した既往の1層RC柱の振動台実験の柱頂部で計測された加速度波形¹⁾をウェーブレット分解した周波数帯(以下ランク)ごとの時刻歴波形およびそれらを台形積分により2階積分した変位波形を示す。2つの図の比較により、高いランク、つまり長周期のランクにおいて加速度の成分としては微小だったものが、2階積分によって加速度での主要なランクにおける変位を超えて極めて大きな変位波形となることがわかる。

そこで、本研究では建物の卓越周期とウェーブレット変換における各ランクのナイキスト周期を比較することによって、積分誤差の原因となる長周期成分の検出と除去を試みる。建物の卓越周期は伝達関数を用いて推定する。また、4.2節に後述するが、ウェーブレット変換後のランクごとの台形積分によって、ランクごとの絶対加速度-相対変位関係を算出することが可能であるため、それらの相関性に有意な関係が見受けられるかを判断することで、当該ランクが誤差成分かどうかの判断を行うこともできる。

(a) ウェーブレット変換後の加速度波形

(b) 周波数帯ごとの積分変位波形

図3 ウェーブレット分解後の加速度波形と積分変位波形

4. 既往の振動台実験記録を用いた検討

本節では過去に行われた振動台実験の記録¹⁾を用いて、ウェーブレット変換を用いた2階積分により算出した変位波形と計測変位波形の比較、および積分変位および計測変位から算出した性能曲線の比較を行った。また、性能曲線についてはエネルギー等価な復元力モデルへの近似も行った。

4.1 既往実験の概要¹⁾

本振動台実験は桃山らにより1991年に科学技術庁防災科学技術研究所の大型振動台を用いて実施された。実験目的は鉄筋コンクリート造柱の動的応答性状の検討とされ、帯筋間隔をパラメータに1968年の十勝沖地震の際に八戸港湾で記録された地震波のE-W成分が、目標最大加速度を500cm/s²として入力された。

各加振実験において試験体および振動台各部の加速度、試験体各部の変位および試験体を構成するRC柱内部の鉄筋のひずみが計測された。本報では曲げ破壊先行型の帯筋間隔50mmの試験体の実験記録を用いた。表1に試験体の構造性能を引用する。なお、この構造性能はコンクリートおよび鉄筋の材料試験の結果からモデル化した材料特性による柱1本の構造特性の4倍として算出された¹⁾。

表1 試験体の構造特性¹⁾

重量 W	247.6 kN
初期弾性剛性 k ₀	596.2 kN/cm
弾性固有周期 T ₀	0.136 sec
曲げひび割れ耐力 Q _c	32.0 kN
曲げ降伏耐力 Q _y	137.7 kN
曲げ終局耐力 Q _u	137.7 kN

(a) 試験体形状および断面詳細¹⁾

図4 試験体概要および計測計画¹⁾

図4に試験体概要および計測計画概要をそれぞれ引用する。試験体は内法高さ850mmの4本の鉄筋コンクリート造柱が2.0m四方に配された1層骨組みである。4本の柱は鋼製の架台で一体とされ、その上部に鉄筋コンクリート製の重りが載せられた。また、加速度計には(株)共和電業製の動ひずみ型加速度計AS-5GB(定格容量:±5G, 応答周波数範囲:DC~100Hz)が用いられ、変位計には(株)共和電業製のリール型変位計のポテンショメータDTP-2MDS(定格容量:±1,000mm, 直線性:定格出力の±0.3%, 分解能:±0.54mm)、(株)キーエンス製のレーザー型変位計LB-01(測定範囲:100±40mm, 直線性:定格出力の±1.6%, 分解能:±0.09mm)がそれぞれ用いられた。サンプリング周波数は加速度、変位ともに200Hzとされた。図5に柱C1下台座部A13センサーで計測された入力地震波時刻歴および加速度応答スペクトルを示す。

図5 入力地震動¹⁾

4.2 変位波形の比較

ウェーブレット変換を用いた加速度の2階積分により応答変位を算出し、通常の台形積分による変位波形および計測変位波形との比較を行った。検討方向はX方向とし、柱C1およびC2の台座部および上部スタブに設置された加速度計(図4(b)中A01、A04、A13、A16)のデータを用いた。なお、通常の台形積分については柱C1およびC2における相対変位の平均値より算出し、計測変位波形は文献1)に倣い、応答時刻11.625秒まではレーザー型変位計(図4(c)中LB1、LB4)、それ以降はリール型変位計(図4(c)中D01、D04)のデータの平均値より算出した。

表2 ウェーブレット変換の周波数特性

ランク	必要ステップ数	時間刻み(sec)	サンプリング周波数(Hz)	ナイキスト周波数(Hz)	ナイキスト周波数(sec)
0	—	0.005	200	100	0.01
1	2	0.01	100	50	0.02
2	4	0.02	50	25	0.04
3	8	0.04	25	12.5	0.08
4	16	0.08	12.5	6.25	0.16
5	32	0.16	6.25	3.125	0.32
6	64	0.32	3.125	1.563	0.64
7	128	0.64	1.563	0.781	1.28
8	256	1.28	0.781	0.391	2.56
9	512	2.56	0.391	0.195	5.12
10	1024	5.12	0.195	0.098	10.24
11	2048	10.24	0.098	0.049	20.48
12	4096	20.48	0.049	0.024	40.96
13	8192	40.96	0.024	0.012	81.92
14	16384	81.92	0.012	0.006	163.84

図6 伝達関数を用いた卓越周期の推定

図7 ランクごとの絶対加速度－相対変位関係

図 8 相対変位時刻歴波形比較(30~43sec)

図 1 は A01 および A13 センサーでの計測記録を通常の台形積分により算出した相対変位波形を示し、図 3 は A01 センサーでのウェーブレット変換を用いた 2 階積分による変位波形を示している。他の計測記録についても同様にウェーブレット変換を用いた 2 階積分を行った。表 2 に本検討に用いたウェーブレット変換の周波数特性を示す。なお、ランク 0 は変換前の計測記録を表す。

図 6 に柱 C1 および C2 における伝達関数を示す。伝達関数により推定される試験体の卓越周期と、ウェーブレット変換におけるナイキスト周期とを比較することによって、2 階積分により誤差が増大する長周期成分の除去を試みた。図 6 より試験体の卓越周期はランク 4 からランク 6 の間(ナイキスト周期 0.16sec から 0.64sec)に位置すると推察され、地震応答における塑性化を考慮すると、表 1 に引用した弾性固有周期よりもやや周期が伸びたものと考えられる。しかし、そこから十分に離れたランク 9 付近にかけても伝達関数の値が増加している。

また、図 7 に示す柱 C1 と C2 での算出結果の平均値より算出したランクごとの絶対加速度-相対変位関係から、ランク 9 以降加速度に対する変位の値が増大し、試験体卓越周期付近の主要なランクのグラフとの相関性が低下していることがわかる。

以上よりランク 9 以降は除去すべき長周期成分が含まれる可能性が高く、また、ランク 8 までは加速度の大きさから除去するのは適当でないと考え、ランク 1 からランク 8 までの和として積分相対変位を算出した。なお、図 6 におけるランク 1 からランク 3 付近の短周期成分の増加については電気ノイズ等による計測誤差の影響であると思われるが、積分による誤差の増大は小さいため、本報では除去は行わないものとした。変位波形の比較を図 8 に示す。

図 8 より、ウェーブレット変換を用いて算出した積分変位と計測された変位はほぼ良好に一致し、通常の台形積分により算出した変

位に比べ飛躍的に精度のよい算出結果となることがわかる。しかし、応答時刻 39 秒から 40 秒にかけて柱主筋が降伏し、それ以降大きく塑性化していくにしたがって誤差が大きくなった。なお、図 8 において応答時刻 30 秒までは応答が小さいことによる紙面上の省略であるが、42 秒以降は試験体が安全架台に接触したため、42 秒以降の応答は検討範囲から除外した。次節での性能曲線の算出においても、同様とした。

4.3 性能曲線の比較

ウェーブレット変換を用いた加速度の 2 階積分により算出した変位(以下積分変位)と、計測された変位(以下計測変位)を用いて性能曲線をそれぞれ算出し、比較を行った。なお、グラフ縦軸の絶対加速度は C1、C2 柱頂部で計測された絶対加速度の平均値から算出した。算出結果を図 9 に示す。

図 9 性能曲線比較

図 10 計測変位時刻歴波形のウェーブレット変換

図 9 より積分変位による最大応答変位は、計測変位による最大応答変位に対し、正側で約 5cm の過小評価となり、負側で約 9cm の過大評価となった。そこで、計測変位時刻歴波形に対してもウェーブレット変換を行い、加速度の 2 階積分と同様にランク 9 以降の成分の除去を行った。算出結果を図 10 に示す。図から、ランク 8 までの主要動成分は、ウェーブレット変換を用いて加速度記録を 2 階積分したものと計測変位波形は、試験体が着座した 42 秒付近まで極めて良く一致していることが分かる。よって図 9 および図 10 より、図 8 の相対変位波形の比較における応答時刻 39 秒以降の誤差はランク 9 以上の長周期成分であり、ウェーブレット変換による長周期成分の除去を行う際に残留変形とともに除去されたものと推察される。ただし、4.4 節で詳細に述べるが、正側に大きく塑性化し残留変形による誤差が生じるまでの 2 つの性能曲線はほぼ精度よく一致しており、降伏点については正確に算出することができていると思われる。そこで、残留変形の算出方法については今後取り組むべき課題とし、本報ではこれら 2 つの性能曲線に対してエネルギー等価な復元力モデルへの近似を行い、復元力特性の比較を行った。

図 11 性能曲線の復元力モデル化概要

表 3 復元力モデル緒元

	正側				負側			
	耐力 (cm/s ²)		変位 (cm)		耐力 (cm/s ²)		変位 (cm)	
	積分変位	変位計変位	積分変位	変位計変位	積分変位	変位計変位	積分変位	変位計変位
第1折れ点	180.1	179.9	0.3	0.4	-183.3	-183.4	-0.3	-0.3
第2折れ点	540.2	539.8	2.3	1.9	-549.9	-550.1	-3.1	-2.1
第3折れ点	540.3	540.3	2.5	2.9	-550.6	-550.6	-4.2	-2.9
最大変位応答点	313.8	211.2	10.2	15.6	-154.5	-395.8	-13.0	-4.3

図 12 性能曲線の復元力モデル化

4.4 性能曲線の復元力モデル化

本報では検討に用いた既往の振動台実験¹⁾における、曲げ破壊先行型の RC 柱の復元力特性を想定し、以下の手順でモデル化を行った。図 11 に性能曲線の復元力モデル化の概要図を示す。

- 1). 原点から最大耐力の 1/4 の耐力となる点までを直線補完し、初期剛性 k_0 を算出する。第 1 折れ点は初期剛性上とし、第 1 折れ点における耐力は第 2 折れ点の耐力の 1/3 とする。
- 2). 第 3 折れ点を最大耐力点とし、初期剛性の 1/1000 の傾きを第 3 勾配とする。第 2 折れ点は第 3 勾配上とし、モデル化前の性能曲線と等価なエネルギー吸収となるように、最大耐力点までの性能曲線の囲む面積 A_1 と第 3 折れ点までの復元力モデルの囲む面積のつりあいにより第 2 折れ点を算出する。
- 3). 最大耐力点を第 3 折れ点とし、最大耐力点以降の性能曲線の囲む面積 A_2 と第 3 折れ点以降の復元力モデルの囲む面積のつりあいにより最大変位応答点を算出する。

本手法では、最大変位応答点において最大耐力となる性能曲線では 3 折れ線近似となり、最大耐力点以降耐力が低下する性能曲線では 4 折れ線の近似となる。

図 11 に示すように、最大耐力点までの性能曲線の囲む面積を A_1 、最大耐力点以降の面積を A_2 とおき、第 1、第 2、第 3 折れ点における耐力を F_c 、 F_y 、 F_{max} 変位を δ_c 、 δ_y 、 δ_{Fmax} とする。 F_{max} および δ_{Fmax} は性能曲線上の最大耐力点を抽出し、モデル化のルールにより F_c 、 δ_c 、 δ_y はそれぞれ式(13)、式(14)、式(15)より算出した。

$$F_c = F_y / 3 \quad \text{式 (13)}$$

$$\delta_c = F_y / (3 \cdot k_1) = F_y / (3 \cdot k_0) \quad \text{式 (14)}$$

$$\delta_y = \delta_{Fmax} - \frac{(F_{max} - F_y)}{k_3} = \delta_{Fmax} - \frac{1000(F_{max} - F_y)}{k_0} \quad \text{式 (15)}$$

F_y は式(16)の面積のつり合い式に式(13)、式(14)、式(15)を代入し、式(17)に示す 2 次方程式の解のうち F_{max} の値に近い方から求めた。

$$A_1 = \frac{1}{2} \{ F_c \cdot \delta_c + (F_c + F_y)(\delta_y - \delta_c) + (F_y + F_{max})(\delta_{Fmax} - \delta_y) \} \quad \text{式 (16)}$$

$$F_y = \frac{-\frac{2}{3}(k_0 \delta_{Fmax} - 1000 F_{max}) \pm \sqrt{\left\{ \frac{2}{3}(k_0 \delta_{Fmax} - 1000 F_{max}) \right\}^2 - 666(500 F_{max}^2 - k_0 A_1)}}{333} \quad \text{式 (17)}$$

最大耐力点以降耐力が低下する場合の最大変位応答点耐力 F_u は、式(18)より算出した。

$$F_u = \frac{2A_2}{(\delta_u - \delta_{Fmax})} - F_{max} \quad \text{式 (18)}$$

算出結果を表 3 および図 12 に示す。2 つの性能曲線とも、正側、負側ともに最大耐力点以降耐力が低下するため、負勾配をもつ 4 折れ線近似となった。表 3 および図 12 より、残留変形が生じたと推察される正側の降伏後剛性(第 3 折れ点)までは積分変位と計測変位による復元力特性は概ね精度よく一致し、残留変形の影響を適切に評価することができれば、本手法によって加速度計測記録から建物の地震応答による塑性率を定量的に求めることが可能であることがわかった。

なお、構造物の内部粘性減衰の影響が大きい場合には、1 自由度系の動的な力のつりあいから、減衰力を含めた復元力と変形の関係となる性能曲線の特性上、モデル化前の性能曲線について内部粘性減衰の影響を適切に評価する必要があるが、文献 1)では、弾性応答時における内部粘性減衰を 3%、塑性化後の内部粘性減衰を 0%とすると試験体の応答性状と精度よく一致すると結論づけられているため¹⁾、グラフの囲む面積の計算精度に大きく影響する塑性化後の内部粘性減衰の影響が小さいと思われ、本報では内部粘性減衰の影響は無視できると判断した。

5. まとめ

性能曲線を用いた建物の被災度判定手法の確立を目的に、ウェーブレット変換を用いた 1 質点系構造物の応答加速度記録の 2 階積分による応答変位算出法を提案し、過去に行われた振動台実験結果¹⁾への適用を試みた。得られた知見を以下に示す。

- 1). 本手法を用いることで通常の台形積分に比べ飛躍的に精度のよい応答変位波形が算出できる。しかし、残留変形については、極めて長周期の成分として本手法では誤差と一緒に取り除かれるため、再現が困難である。
- 2). 加速度記録のみから、1 層試験体の性能曲線を算出できた。
- 3). 本手法により求めた変位と計測変位を用いて算出した性能曲線を比較した結果、残留変形の影響で変位の最大応答点については誤差が大きくなったが、降伏後最初の除荷変位までは両曲線は良好に一致した。
- 4). 積分変位を用いて求めた性能曲線を、エネルギー等価な復元力モデルへ近似することにより、地震応答による構造物の塑性率を定量的に算出できることを示した。しかし、残留変形成分が取り除かれるため、最大塑性率は実際の計測値よりも小さくなった。

謝辞

芝浦工業大学の柁山健二教授には、本研究において実験記録のご提供および貴重なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柁山健二：オンライン地震応答実験の精度向上に関する研究，東京大学大学院工学研究科第 1 種博士論文，1996
- 2) 斎藤知生：システム同定による建築物の確率論的損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第 557 号，pp. 93-100，2002. 7
- 3) 濱本卓司、森田高市、勅使川原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 560 号，pp. 93-100，2002. 10
- 4) 濱本卓司、大浴佳治、三好敏晴：アクティブ同定手法を用いた多層建築物の損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 539 号，pp. 51-56，2001. 1
- 5) 濱本卓司、近藤一平：鉛直・水平方向探索を用いた偏心を有する多層建築物の二段階損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 519 号，pp. 21-28，1999. 5
- 6) 仁田佳宏、西谷章：各層を単位とするサブシステムの同定に基づく剛性のヘルスマonitoring，日本建築学会構造系論文集，第 573 号，pp. 75-79，2003. 11
- 7) 中村充、竹脇出、安井謙、上谷宏二：限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定，日本建築学会構造系論文集，第

- 528 号，pp. 75-82，2000. 2
- 8) 中村充、安井謙：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第 517 号，pp. 61-68，1999. 3
- 9) 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法，日本建築学会構造系論文集，第 569 号，pp. 119-126，2003. 7
- 10) 楠浩一，勅使川原正臣，小出栄治：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 1 判定方法の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 961-962，2003. 7
- 11) 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 2 鉄骨平面フレームの振動台実験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 797-798，2004. 7
- 12) 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 3 余震を含めた等価粘性減衰定数の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 949-950，2006. 7
- 13) 松本裕史，茜絢也，楠浩一，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 4 性能曲線の精度検討法概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 25-26，2007. 7
- 14) 茜絢也，松本裕史，楠浩一，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 5 解析結果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 27-28，2007. 7
- 15) 伊佐治勝大，楠浩一，松本裕史，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 6 加速度計配置についての検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 249-250，2008. 7
- 16) 楠浩一，松本裕史，伊佐治勝大，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 7 計測計画と性能曲線の作成方法，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 251-252，2008. 7
- 17) 松本裕史，楠浩一，伊佐治勝大，田才晃，田中稲子：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 8 計測記録からの性能曲線作成と応答評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 253-254，2008. 7
- 18) 松本裕史，楠浩一，前田礼一郎，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 9 1・2 次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討その 1 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 703-704，2009. 7
- 19) 前田礼一郎，楠浩一，松本裕史，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 10 1・2 次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討その 2 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 705-706，2009. 7
- 20) 前田 礼一郎，楠浩一，伊佐治勝大，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 11 等価周期・等価粘性減衰算出方法の比較 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 175-176，2010. 7
- 21) 伊佐治勝大，楠浩一，前田 礼一郎，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 12 等価周期・等価粘性減衰算出結果・検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 177-178，2010. 7
- 22) 山下美帆，楠浩一，川村学，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 13 減衰力の計測及び復元力の算出 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 883-884，2011. 7
- 23) 川村学，楠浩一，山下美帆，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 14 実大 RC 建物の振動台実験記録を用いた検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造 II，pp. 885-886，2011. 7
- 24) 榊原進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局，1995
- 25) Mei Kobayashi et al., Wavelets and their applications CASE STUDIES, Society for industrial and applied mathematics, 1997
- 26) Iwan, W. D., et al.: Some Observations on Strong-motion Earthquake Measurement using a Digital Accelerograph, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, pp. 1255-1246, 1985. 10

(2012年 9 月 26 日原稿受理，2013 年 3 月 11 日採用決定)