

論文 残余耐震性能判定のための Wavelet 変換を用いた加速度計測値から算出する性能曲線の精度に関する研究

日向 大樹*1・楠 浩一*2・田才 晃*3・川村 学*4

要旨：建物の各階に配置された加速度計の計測値から性能曲線を算出し、主として鉄筋コンクリート構造の建物を対象に残余耐震性能判定を瞬時に実行する技術の確立に向け検討を進めてきた。本論文では、本震の加速度計測値のみから求めた性能曲線の精度を確認することを目的としている。検討には、既往の鉄筋コンクリート試験体の振動台実験結果を引用し、Wavelet 変換を用いて加速度計測値を2階積分して算出した変位と、変位計測値のそれぞれから性能曲線とモード形を算出し比較を行った。

キーワード：Wavelet 変換, 加速度計測値, 性能曲線, 余震, 残余耐震性能, 復元力モデル化

1. はじめに

建物の各階に安価な加速度計を設置し、その計測値から建物の地震時の応答を算出し、地震後、余震に対する残余耐震性能をほぼリアルタイムで自動的かつ定量的に判定する技術が提案され²⁾、その実用化に向けて研究を重ねてきた¹⁾⁶⁾。

残余耐震性能の判定方法については文献 2), 文献 3) に詳しいが、建物の等価 1 自由度系での荷重-変形関係に相当する性能曲線と地震動の特性である要求曲線の比較により判定を行う。性能曲線の算出に当たり建物の相対変位が必要であるが、本装置では設置が容易である加速度計の計測値のみから変位を算出する。加速度を2階積分すると変位が得られるが、一般的に、加速度計測値を用いた場合、微小な計測誤差が2階積分により無視できない程大きくなり、有意な変位が算出できない。そこで、一連の研究¹⁾⁶⁾では Wavelet 変換を用いてその誤差成分を取り除いた加速度について2階積分を行い、変位を算出している。

Wavelet 変換とは、時刻歴波形を維持したまま、異なる周波数帯の波形に分解できる時間周波数解析手法である¹¹⁾。文献 5)では高次モードの影響が大きい構造物を対象に、Wavelet 変換を用いることで特定のモードが卓越した性能曲線を抽出する方法が提案され、1次モードと2次モードの抽出が可能であることを確認した。文献 6)では実建物の加速度計測値から Wavelet 変換を用いて1次モードの性能曲線を作成し、最大応答点から等価周期と等価粘性減衰定数が算出可能であることを示した。

一方、今まで加速度計測値に Wavelet 変換を用いて2階積分により算出した変位を用いた性能曲線の精度については詳しく検討がなされていない。そこで本論文では、

加速度計測値と変位計測値が得られる既往の鉄筋コンクリート試験体の振動台実験結果を用い、加速度計測値のみから算出した性能曲線と変位計測値を用いて算出した性能曲線の比較を行い、性能曲線の精度について検討した。さらに、多層建物の塑性域におけるモード形の変化と残留変形の影響について検討した。

2. Wavelet 変換の概要^{5),6),11)}

Wavelet 変換は、ある N 個のデータを含む信号 $f(x)$ を特定の周波数帯の信号のみを含む信号 $g_1 \dots g_n$ と残りの信号 f_n に分解する時間周波数解析手法である。この時、分解された信号は数学的にその直交性が保証され、n はデータ数に依存し、式(1)から求められる。

$$n = \log_2 N \quad (1)$$

ここで i 番目の信号 g_i を Rank i の信号と呼ぶこととし、Rank i のナイキスト振動数 $\Delta_{t,i}$ は $f(x)$ の時間刻みを Δ_t とすると式(2)で表わされる。

$$\Delta_{t,i} = \frac{1}{2^i \Delta_t} \quad (2)$$

加速度計の計測誤差は主に極短周期成分と周期が 10 秒を超える様な長周期成分に分類されるが、そのうち極短周期成分は2階積分しても算出される変位に与える影響は微量である。Wavelet 変換を用いて加速度波形を分解し、長周期成分の Rank 以外の波形を足しあわせることで有意な加速度波形が得られ、それを2階積分することで、加速度計測値から変位を算出することができる。

3. 性能曲線の算出と復元力特性のモデル化

残余耐震性能判定のための性能曲線は建物の代表加速

*1 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション学府 修士課程 (学生会員)

*2 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) (正会員)

*3 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院 教授 工博 (正会員)

*4 大成建設(株) 設計本部 工修 (会員外)

度-代表変位関係の骨格曲線とする^{4),5),6)}。ここで、骨格曲線とは振動中にそれまでの最大変形に達した点を抽出して結んだ応答曲線である。本研究では実計測値から算出した性能曲線の特徴をより適切に評価するために、以下の手順で一般的な復元力モデルへの近似を行う。図-1にその概要図を示す。

- 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(図中 F_c)は第2折れ点の耐力(図中 F_y)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が等しくなるよう第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D点を算出する。

本手法では、最大変位応答点と最大耐力点と同じとなる場合は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-1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 、 $\delta_{F_{max}}$ とする。 F_{max} および $\delta_{F_{max}}$ 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(3)、式(4)、式(5)より算出する。

$$F_c = F_y / 3 \quad (3)$$

$$\delta_c = F_y / (3 \cdot k_1) = F_y / (3 \cdot k_0) \quad (4)$$

$$\delta_y = \delta_{F_{max}} - \frac{(F_{max} - F_y)}{k_3} = \delta_{F_{max}} - \frac{1000(F_{max} - F_y)}{k_0} \quad (5)$$

F_y は式(6)の面積のつり合い式に式(3)、式(4)、式(5)を代入し、式(7)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るものとする。

$$A_1 = \frac{1}{2} \{ F_c \cdot \delta_c + (F_c + F_y)(\delta_y - \delta_c) + (F_y + F_{max})(\delta_{F_{max}} - \delta_y) \} \quad (6)$$

$$F_y = \frac{-\frac{2}{3}(k_0 \cdot \delta_{F_{max}} - 1000F_{max}) \pm \sqrt{X}}{333} \quad (7)$$

ただし、 $X = \left\{ \frac{2}{3}(k_0 \cdot \delta_{F_{max}} - 1000F_{max}) \right\} - 666(500 \cdot F_{max}^2 - k_0 \cdot A_1)^2$

最大耐力点以降、耐力が低下する場合の最大変位応答 F_u 点は、式(8)より算出する。

$$F_u = \frac{2A_2}{(\delta_u - \delta_{F_{max}})} - F_{max} \quad (8)$$

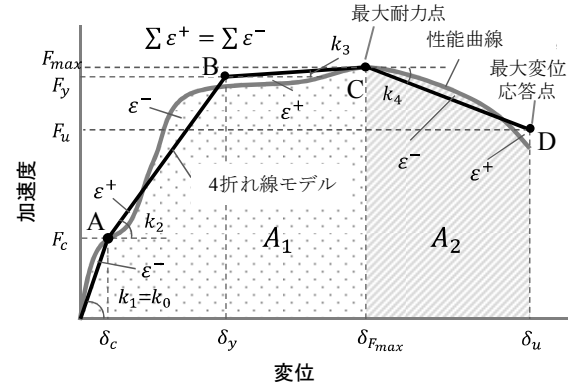


図-1 性能曲線の復元力モデル化の概要図

4. 既往の振動台実験結果を用いた検討

本検討では、既往の鉄筋コンクリート試験体の振動台実験結果を引用し、加速度計と変位計の計測値を用いて、各検討を行った。

4.1 各試験の概要

検討対象の試験体は平成19年に横浜国立大学が実施したソフトランディング耐震補強の振動台実験⁷⁾(以下、SLと呼ぶ)、および平成5年に科学技術庁防災科学技術研究所が実施した、実大3層鉄筋コンクリート構造物の振動台実験^{8),9)}(以下、実大と呼ぶ)である。ここではそれぞれの試験体の概要を示すが、詳細はそれぞれの参考文献を参照されたい。

SL試験体の全体図を図-2に、試験体諸元を表-1に示す。SL試験体はせん断補強筋が入っていないせん断破壊先行のRC柱6本、免震装置が乗る鉄骨柱4本と上部構造としての錘(3.66t)から構成される。免震装置は錘に接触しておらず、柱破壊後に上部の錘が免震装置に着座する。この実験では、強柱と弱柱の強度が異なる2種の柱を組み合わせることで破壊順序をパラメータとし、ねじれの影響を検討しているが、今回はねじれの影響が少ない、全て強柱のSL_1試験体のみを検討対象とする。入力地震動はEL Centro NS、計測の間隔は0.005secである。入力倍率は試験体が弾性範囲のもの(60%)と、塑性化が進行したもの(250%)の2種類を用いる。これ以上の入力については錘が免震装置に着座しており、鉄筋コンクリートの復元力特性を有していないことから検討対象外とした。変位計測値は試験体中央部のもの、加速度計測値は試験体上部両端の平均値を用いた。

実大試験体の梁伏せ図と立面図を図-3、図-4に、試験体諸元を表-2に示す。入力地震動は八戸EW波の最大加

速度を 600gal に基準化した地震波である。実大試験体は 1F 柱脚、各階梁端に降伏ヒンジを形成し、曲げ降伏先行の全体崩壊形を形成した⁸⁾。加速度および変位は各階中央部の計測値を用いたが、変位は層間変位を計測しているため、各階の建物基礎に対する相対変位は、地上階から対象階までの層間変位を足し合わせることで算出した。

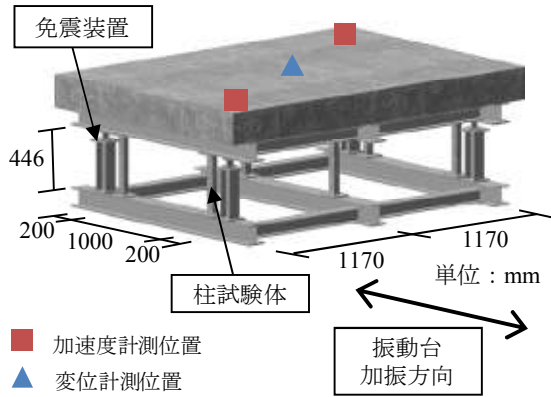


図-2 試験体 (SL)

表-1 試験体諸元 (SL)

	柱
断面 (mm)	□-50×50
主筋	4-M6
せん断補強筋	-
Fc (N/mm ²)	60

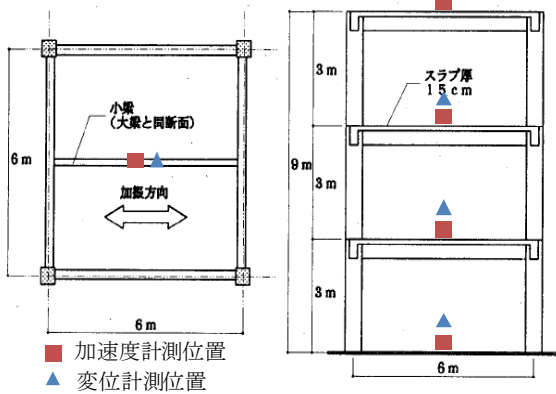


図-3 梁伏せ図 (実大)

図-4 軸組み図 (実大)

表-2 試験体諸元 (実大)

	柱	R 階梁	1,2 階梁
断面 (mm)	□-450×450	□-250×400	□-300×500
主筋 (上端筋)	8-D22	2-D22	2-D22 + 1-D19
主筋 (下端筋)		2-D16	2-D22
せん断補強筋	D10 @ 100	D10 @ 200	D10 @ 200
Fc (kgf/cm ²)	300		

4.2 主要 Rank の判定方法

Wavelet 変換を用いて分解した波形のうち、計測誤差である長周期成分を多く含む不要な Rank と有意な Rank (以

下、主要 Rank) を判定する方法として伝達関数から建物の主要な周期帯を推定し、その周期帯と各 Rank の代表加速度-代表変位関係の履歴曲線が有意な相関関係を示しているか確認した上で判定する方法を用いる。SL_1 試験体の入力倍率 60% の振動台上加速度に対する試験体上部加速度の伝達関数を図-5 に、各 Rank の代表加速度-代表変位関係の履歴曲線を図-6 に示す。

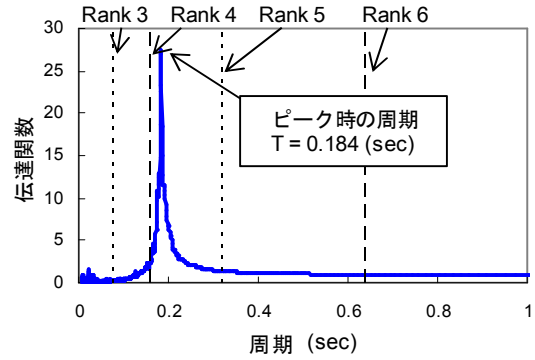


図-5 伝達関数 (SL_1 入力倍率 60%)

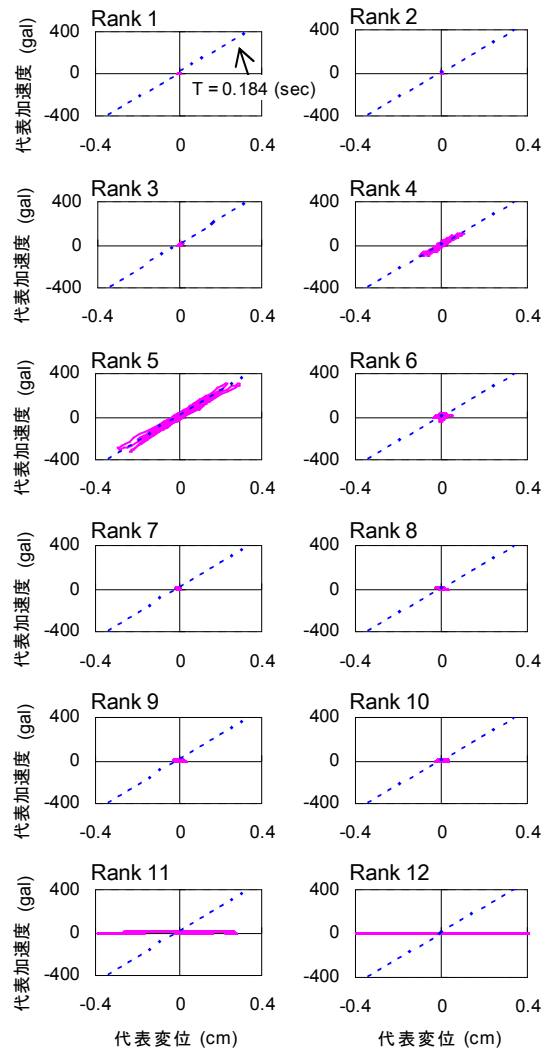


図-6 各 Rank 代表加速度-代表変位関係 (SL_1 入力倍率 60%)

図-5には各 Rank のナイキスト周期を併せて示す。図-6の各グラフには伝達関数のピークと同じ周期(0.184sec)を破線で示す。図-6から Rank4,5に、伝達関数ピークの周期と同じ周期帯に強い相関関係があることが分かる。Rank6以降の履歴曲線では応答周期との相関がなく、加速度も小さい。そのため、SL_1試験体の入力倍率60%の試験体では Rank6以降の成分を不要な Rankとして扱い、Rank1~5の履歴曲線の足し合わせを Wavelet 変換を用いて算出した履歴曲線とする。同様にして各試験体について主要 Rank を判定した結果を表-3に示す。

4.2 性能曲線の比較

加速度計測値のみから算出する性能曲線の精度を確認することを目的とし、各計測値について加速度計測値のみから算出した性能曲線(主要 Rank 加速度-主要 Rank 加速度を2階積分して算出した変位関係)と、変位計測値を用いて算出した性能曲線(計測加速度-計測変位関係)の比較を行った。図-7~図-9に SL_1試験体の入力倍率60%、250%、および実大試験体の性能曲線の比較をそれぞれ示す。ただし、多層建物である実大試験体では計測されたモード形が唯一のモード形であると仮定して代表加速度、代表変位を算出した^{2),4),5),6)}。表-3に各性能曲線を算出する際に用いた主要 Rank と最大応答変位を示す。

図-7~図-9の各性能曲線の比較を見ると、それぞれの性能曲線は形がおおよそ一致しており、加速度計測値のみから求まる性能曲線は有意なものであることが分かる。ただし、表-3を見ると、弾性範囲の応答である SL_1試験体の最大応答点は概ね一致しているものの、特に実大試験体の性能曲線では、最大応答点に大きな差がある。ここで、実大試験体のそれぞれの方法により算出した代表加速度-代表変位関係の履歴曲線を図-10、図-11に示す。図-10から実大試験体の履歴曲線では履歴ループの中心が横軸の正側へ移動し、試験体に残留変形が生じていることが推察できる。しかし、図-11は履歴ループの形が変位計測値から求めたものと異なり、残留変形も確認できない。ここから、Wavelet 変換を用いて加速度計測値から算出される変位には残留変形が現れないこと、実際には残留変形がある場合に最大応答点が真の最大応答とずれて算出される可能性があることが確認された。これは Wavelet 変換では加速度の残留変形成分が極めて周期の大きい Rank に分解され、計測誤差成分と一緒に除去されてしまったことによる。

表-3 主要 Rank と最大応答変位 一覧

試験体 (入力倍率)	主要 Rank	変位計 (cm)		加速度計 (cm)		
		δ_{max}	δ_{min}	δ_{max}	δ_{min}	
SL_1	60%	1~5	0.30	-0.36	0.32	-0.34
	250%	1~7	1.42	-1.36	1.11	-1.22
実大3層	1~9	21.61	-17.53	19.12	-21.10	

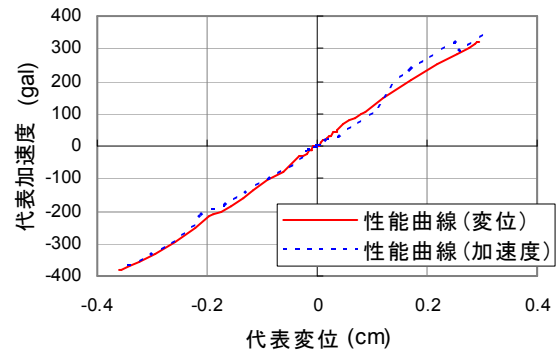


図-7 性能曲線比較 (SL_1 - 入力 60%)

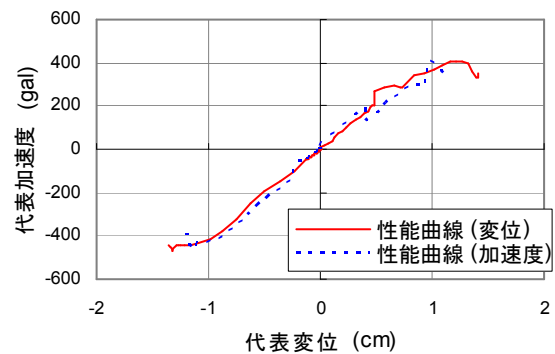


図-8 性能曲線比較 (SL_1 - 入力 250%)

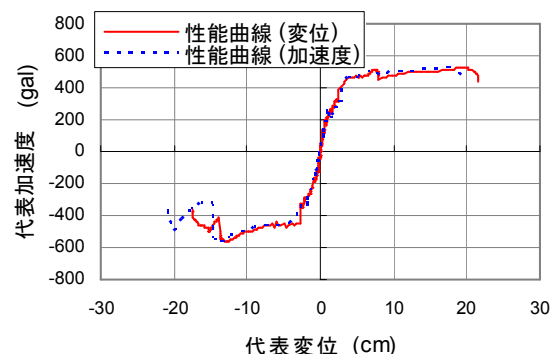


図-9 性能曲線比較 (実大)

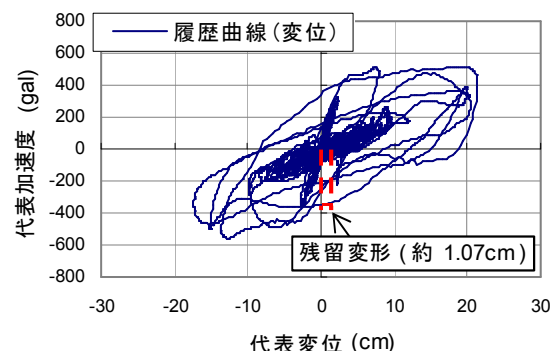


図-10 代表加速度-代表変位関係(変位) (実大)

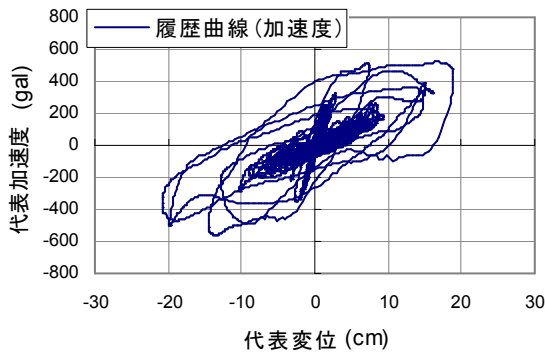


図-11 代表加速度-代表変位関係(加速度) (実大)

4.3 性能曲線の復元力モデル化

3.で示した手法により、各計測値を用いて求めた性能曲線を4折れ線の復元力特性にモデル化した。図-12に実大試験体の変位計測値を用いて算出した性能曲線の復元力モデル(復元力モデル(変位))と加速度計測値のみから算出した性能曲線の復元力モデル(復元力モデル(加速度))の比較を示す。図-12を見ると、塑性化する前の範囲である降伏点と等価な第2折れ点までは、加速度計測値のみから算出される性能曲線と変位計測値を用いて算出される性能曲線の差は僅かであり、元の性能曲線の精度を損なうことなく復元力特性のモデル化ができることが確認された。

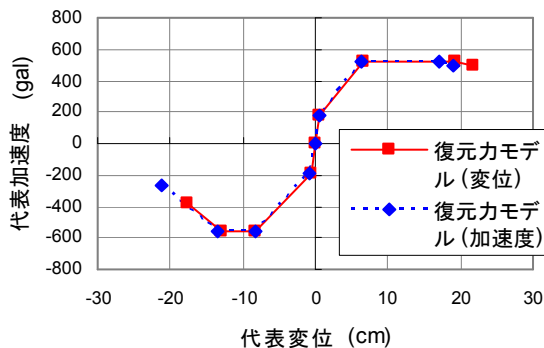


図-12 復元力モデルの比較 (実大)

一方、3.で示した復元力特性のモデル化の手法は建物が塑性化し、性能曲線上で一定量のエネルギー吸収をしている場合を対象としているため、建物の応答が弾性範囲に納まった場合の性能曲線に対して本モデル化手法を適用すると、適切に評価できない。そのため、残余耐震性能を判定するにあたり、弾性範囲の性能曲線を対象に復元力モデルを作成する必要はなく、始めに弾性・塑性の判定をし、塑性化していると判定された場合のみ性能曲線を復元力モデル化する必要がある。その判定基準として、性能曲線から求まる建物の剛性の変化を指標として検討した。初期剛性に対する最大応答点の等価剛性の比率をそれぞれの計測値で求めた結果を表-4に示す。

初期剛性は最大耐力点の4分の1の耐力に達する点の剛性とし、最大応答点の等価剛性は性能曲線の最大変位点と原点を結んだ直線の傾きとする。表-4から弾性範囲の応答であるSL_1試験体の入力倍率60%の剛性の比率は、おおよそ0.9以上であり、剛性の比率が0.9以上であれば、弾性範囲内と判断して良いと言えそうである。今後はさらに検討を重ね、建物が概ね弾性範囲に留まっていたことを判定する方法を確立する必要がある。

表-4 初期剛性に対する等価剛性の比率

試験体 (入力倍率)	変位計		加速度計		
	正側	負側	正側	負側	
SL_1	60%	0.89	0.92	1.12	0.97
	250%	0.57	0.82	0.55	0.66
実大3層	0.06	0.07	0.10	0.06	

4.4 モード形の比較

残余耐震性能判定には、本震の最大応答点よりも大きな応答に対する性能曲線が必要であり³⁾、本震の性能曲線から余震における性能曲線を推定することが求められる。1層建物の場合は復元力モデルの第3勾配または第4勾配を延長することで推定できる。しかし、多層建物において復元力モデルを延長する場合は、塑性域のモード形が変化しないことが要求される⁹⁾。

そこで、全体崩壊形を形成した実大試験体を対象に、復元力モデル上の第2折れ点と最大変位応答点におけるモード形を変位から算出し比較した。実大試験体は各層の最大層間変位が層間変形角で約1/30に達しているため、塑性域としては十分な範囲で検討可能である。ここで、表-5に示す通り、各層間変位には残留変位が生じているため、加速度計測値から算出した変位は真の最大応答点とずれている。図-13に第2折れ点と最大変位応答点における、変位計測値から求めたモード形と加速度計測値にWavelet変換を用いて2階積分により算出した変位から求めたモード形を示す。なお、これらモード形は各層の地動に対する相対変位分布が1次モード形と相似であるとみなして算出し、全ての階の変形成分を合計すると正側では1、負側では(-1)となるように基準化している。図-13を見ると両方でモード形は良好に一致していることが分かる。よって、本実験において、加速度計測値から算出される変位のモード形に対する残留変形の影響は少なく、塑性域内のモード形はおよそ一定であると考えると差し支えない程度であったと言える。

以上より、本検討の限りでは、1層および全体崩壊形を形成する多層の鉄筋コンクリート建物において、残留変形が生じた場合であっても、加速度計測値のみから本震の塑性域に達する前までの性能曲線が精度良く算出できること、塑性域におけるモード形に大きな変化がない

ことを確認した。ただし、層崩壊等の局所的な破壊をする構造物については、今後検討が必要である。

表-5 各層の層間変位計測値 (実大)

	2F	3F	RF
最大変位 (cm)	9.640	12.268	13.233
残留変位 (cm)	0.241	0.891	0.955

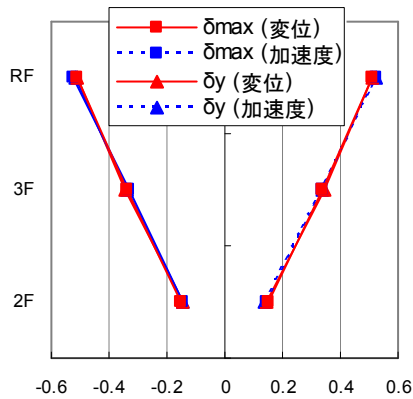


図-13 モード形比較 (実大)

5. まとめ

SL 試験体および実大試験体の振動台実験を対象に、加速度計測値に Wavelet 変換を適用し、2 階積分によって算出した変位を用いて性能曲線とモード形を算出し、それぞれ変位計測値から求まる値と比較することで、以下の知見を得た。

- 1). 長周期成分を Wavelet 変換を用いて除去するため、建物に残留変形が生じた場合、加速度計測値のみから算出される性能曲線に残留変形が現れず、最大応答点が真の最大応答点とずれる場合があることを確認した。
- 2). 1).のような場合であっても、塑性域に達する前までの性能曲線は変位計測値を用いて求めた性能曲線と良好に一致し、復元力特性のモデル化をすることによって精度良く降伏点を算出できることを確認した。
- 3). 全体崩壊形を形成する多層鉄筋コンクリート造試験体を対象とした本振動台実験結果において、残留変形が生じる場合であっても塑性域のモード形が概ね一定であることを確認した。この場合、本震に対する性能曲線の復元力モデルの第3勾配または第4勾配を延長することで、余震に対する性能曲線を推定できると考えられる。
- 4). 本復元力特性のモデル化を適用する前に、対象建物の弾性・塑性の判定をする必要があり、初期剛性に対する等価剛性の比率を用いて判定する手法を示した。

- 5). 今後、加速度計測値のみから残留変形の影響を考慮した真の最大応答点を精度よく算出する方法について検討する必要がある。

謝辞

日本大学の北嶋圭二助教授には、本研究において実験記録をご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1). 楠浩一ほか：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その1～16, 日本建築学会学術講演集, 2003～2012年
- 2). 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, No.569, p.119-126, 2003年
- 3). 楠浩一, 勅使川原正臣：余震に対する等価粘性減衰定数評価に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, 28巻2号 p.1057-1062, 2006年
- 4). 茜絢也, 松本裕史, 楠浩一, 田才晃：加速度計を用いて作成した建物の性能曲線の精度検証, コンクリート工学年次論文集, 29巻3号 p.1039-1044, 2007年
- 5). 松本裕史, 前田礼一郎, 楠浩一, 田才晃：Wavelet変換を用いた性能曲線のモード分解法の有効性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 31巻2号 p.895-900, 2009年
- 6). 伊佐治勝大, 前田礼一郎, 楠浩一, 田才晃：Wavelet変換を用いた残余耐震性能判定のための等価周期と等価粘性減衰算出方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 32巻2号 p.925-930, 2010年
- 7). 梶真也, 楠浩一, 田才晃：ソフトランディング耐震補強における柱の破壊順序をパラメータとした振動台実験, 日本建築学会学術講演集, p.267-268, 2008年
- 8). 北嶋圭二ほか：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その1～4, 日本建築学会学術講演集, 1995年
- 9). 科学技術庁防災科学技術研究所ほか：強震動による鉄筋コンクリート構造の破壊に関する研究, 平成5年度研究報告書, 1993年
- 10). 建設省大臣官房技術調査室 監修・(社)建築研究振興協会 編：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン, 技法堂出版, 2007年
- 11). 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年