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

多質点系構造物の場合

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD OF REALTIME
RESIDUAL SEISMIC CAPACITY EVALUATION
OF EXISTING STRUCTURES WITH ACCELEROMETERS
In the case of MDOF system structures

楠 浩一*, 日向大樹**, 服部勇樹**, 田才 晃***

*Koichi KUSUNOKI, Daiki HINATA, Yuki HATTORI
and Akira TASAI*

This paper shows a new method of the double integral with *Wavelet Transformation* to compute the capacity curve of Multi-degree of freedom system. The response displacement of the building is derived from the measured acceleration. It enables us to judge the damage of the building quickly soon after the earthquake. The validity of the method is also discussed through the past shaking test of R/C structure.

Keywords : *Evaluation of Residual Seismic Capacity, Measurement of Acceleration, Capacity Curve, Demand Curve, Wavelet Transformation*

残余耐震性能判定, 加速度計測, 性能曲線, 要求曲線, ウェーブレット変換

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方を中心に非常に広範囲の建物が被災した。その為、応急危険度判定を実施することが想定されていた構造技術者もまた、多くが被災した。被害が特定の県に集中した場合に、周辺自治体より応援が入ることも、広範囲災害では困難であることが明らかとなった。また、超高層建物など、目視による調査では膨大な時間がかかり、とても現実的でないことも露呈した。更に、1981年の建築基準法改正や高層建物の普及に伴い、構造設計においては、柱ではなく梁に降伏ヒンジを計画し、建物の特定層や部分に損傷が集中せず、建物全体でより多くのエネルギー吸収を行う全体崩壊形建物が推奨されてきた。一般建物の多くは、梁は天井などの仕上げに隠されており、梁の損傷度を目視により確認することは困難を極める。更に、全層の梁で降伏ヒンジが形成される可能性があるため、建物の全ての梁を調査する必要が生じ、これもまた現実的ではない。

これまで、建物の損傷状態や地震被害の状況を判定するヘルスモニタリング技術に関する研究は数多くなされている(例えば、1)~8)。その手法の一つとしてシステム同定がある(例えば、1)~4)。しかし、これらはセンサーの計測対象や計測数に違いがあるものの、建物の固有周期や各層の剛性低下率を算出し、その変化から損傷の有無と程度を把握するに留まるものが大部分を占める。この他にも、層剛性などの物理特性を直接算出するもの(例えば、5), 6)があるが、これらもどの程度剛性が低下した場合に損傷が生じたと判定するべきか、建物の構造

形式や建物形状に依存するため、得られた結果を踏まえた工学的な判断が必要となる。それに対し、中村ら⁷⁾は実際に鉄骨構造物に生じた被害状況と計測結果を照らし合わせ、具体的な損傷程度に対応した層剛性低下率を例示している。また、倉田ら⁸⁾はモード解析を用い、想定される損傷パターンに対する振動特性の変化を学習データとして蓄積し、実建物の振動特性の変化から損傷箇所を特定する手法を提案している。

一方、楠らが文献 9)~15)で提案している技術は、建物の各層に1台程度置かれた加速度計の計測値から、地震後の残余耐震性能判定を、リアルタイムで行うことに特徴がある。本技術により、本震直後に建物の安全性を住民に表示することが可能となる。また、対象の建物に加速度計とサーバーPCを設置するだけで判定が可能であり、事前に建物の構造解析モデルを作成するなどの手間がなく、汎用性の高いものであると言える。

1.1 判定方法の概要

判定方法の概要図を図1に示す。判定では、建物に設置された加速度計の計測値から算出する建物の荷重-変形関係に相当する代表加速度-代表変位関係である性能曲線と、建物基礎部の加速度計測値から算出される加速度応答スペクトル-変位応答スペクトル関係である要求曲線の比較により、大地震によって損傷の生じた建物における余震に対する応答値を推定する。その推定した余震に対する応答値と予め設定された限界変形を比較することで余震に対する安

* 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都市イノベーション研究院
教授・博士(工学)

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

全性の判定を行う。ここで、要求曲線を算出するためには、減衰定数を仮定する必要がある。建物が弾性応答をしている場合、要求曲線は地動加速度計測値と建物の内部粘性減衰定数から求めることができる(図中 Curve1)。しかし、図中(A)点で建物の剛性が大きく低下すると、建物の非線形性により生じる履歴減衰効果を更に考慮する必要がある。履歴減衰は建物の損傷に応じて増加すると考えられるため、代表変位が大きくなるに従って履歴減衰も大きくなる。その為、要求曲線は(B)点より図中 Curve2 のように Curve1 に比べ低減される。性能曲線と履歴減衰を考慮した要求曲線の交点(図中(C)点)が本震の最大応答点と推定できる。

一方余震に関しても、本震と余震を非常に長時間の1つの地震動と考えると、同じ手法で余震での最大応答点を推定できる。本震のみの場合に比べ、本震と余震を1つの地震動と考えると、建物への入力エネルギーはその分増えるため、建物の応答変位は本震のみの場合と比べ増加する。つまり、相対的に履歴減衰効果が低下したと考えることができる(図中 Curve3)。余震での最大応答変位は、この要求曲線と性能曲線の交点となる。

実際に判定を行う際は、建物の卓越するモード系を抽出した等価1自由度系で推定される余震での最大応答点を、計測されたモード系に従って各層の層間変形に還元し、各層の限界層間変形と比較することとなる。なお、判定は1次モードを基本とし、1つの主要な振動モードのみを用いて行うことを想定しているが、超高層建物などで、複数のモードが卓越するような場合は別途検討が必要である。

図1 判定方法の概要図

1.2 研究目的

残余耐震性能判定を行うためには、精度良く性能曲線を算出することが必要である。性能曲線を算出するためには建物各階の基礎に対する相対変位が必要であるが、楠らは文献9)において建物の卓越周期に注目し、加速度計測値から時間領域において2階積分を行うことで各階相対変位を算出し、それらを用いて多質点系建物の性能曲線を算出している。しかし、文献9)の付録にもあるように、この性能曲線は計測されたモード系が唯一のモード系であるという仮定を用いて性能曲線の算出を行っている。そのため、高次モードの影響を無視できない建物においては、性能曲線には高次モードの振動成分が含まれてしまう。さらに、建物の塑性化に伴い、等価質量の

大きさが変動することを考慮できない。

一方、文献10)では、時間周波数解析の1つである Wavelet 変換を用いることで、加速度計測値の2階積分から変位波形を得ることができること、およびその値を用いて1自由度系の建物において性能曲線が算出できることを確認している。さらに、Wavelet 変換を用いることにより、加速度計測値から1次モード成分を抽出できるため¹³⁾、等価質量の変動を考慮した性能曲線の算出が可能となる。つまり、文献9)で示されている性能曲線より多質点系での精度が向上する。

そこで本報は、文献10)の性能曲線算出手法を多質点系に拡張し、要求曲線と比較可能であることを示す。さらに、既往の振動台実験の結果を用い、実際に多質点系建物の性能曲線を加速度計測値から算出できることを確認する。また、計測から得られた性能曲線を定量的に扱うため、復元力特性のモデル化を行った。

2. 多質点系の等価1自由度系への縮約方法^{16), 17), 18)}

本章では、設計に用いられる等価線形化法での多質点系の等価1自由度系への縮約方法を示す。ただし、実際の設計では静的荷重増分解析から得られる各層の外力と相対変位を用いる。

多質点系である建物の弾性時の運動方程式は、式(1)のように表せる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_0 \quad \text{式(1)}$$

$[M]$: 質量マトリクス、 $[C]$: 減衰マトリクス、 $[K]$: 剛性マトリクス、 $\{\ddot{x}\}$: 基礎に対する相対加速度ベクトル、 $\{\dot{x}\}$: 基礎に対する相対速度ベクトル、 $\{x\}$: 基礎に対する相対変位ベクトル、 $\ddot{x}_0$: 地動加速度

多質点系の建物は、固有周期と固有振動モードを有している。自由度が N 個ある場合、固有周期および固有振動モードも N 個それぞれ独立して存在する。それらは固有値解析を行うことで、 s 次の自由度として、固有周期 sT 、固有角振動数 $s\omega (= 2\pi/sT)$ 、固有振動モードを表す固有ベクトル $\{s u\}$ が得られる。各モードの応答を別個に算出しても、 $\{x\}$ は式(2)のように求めることができる。

$$\{x\} = \sum_{s=1}^N \{s u\} \cdot s q = [U]\{q\} \quad \text{式(2)}$$

$s q$: s 次の固有振動

式(2)を式(1)に代入することにより、 $s q$ に関する N 個の方程式を得ることができる。

$$s\ddot{q} + 2s h \cdot s\omega \cdot s\dot{q} + s\omega^2 \cdot s q = -s\beta \cdot \ddot{x}_0 \quad \text{式(3)}$$

$$s=1 \sim N$$

$$s\beta = \frac{\{s u\}^T [M] \{1\}}{\{s u\}^T [M] \{s u\}} = \frac{\sum m_i \cdot s u_i}{\sum m_i \cdot s u_i^2}$$

$s h$: s 次モードの減衰定数、 $s\beta$: s 次モードの刺激係数

さらに、 $s\beta \cdot \{s u\}$ は刺激関数であり、要素が全て1のベクトル $\{1\}$ の s 次固有モード成分に相当し、確定値である。

$$\{1\} = \sum_{s=1}^N s\beta \cdot \{s u\} \quad \text{式(4)}$$

ここで、各次の応答値である $s q$ を式(5)のように $s\beta \cdot s q_0$ とおくことで、地動 $\ddot{x}_0$ に対する応答として扱うことができる。

$${}_s q = {}_s \beta \cdot {}_s q_0 \quad \text{式 (5)}$$

これにより、式(2)、式(3)はそれぞれ式(6)、式(7)と表される。

$$\{x\} = \sum_{s=1}^N {}_s \beta \cdot \{ {}_s u \} \cdot {}_s q_0 \quad \text{式 (6)}$$

$${}_s \ddot{q}_0 + 2 {}_s h \cdot {}_s \omega \cdot {}_s \dot{q}_0 + {}_s \omega^2 \cdot {}_s q_0 = -\ddot{x}_0 \quad \text{式 (7)}$$

$$s=1 \sim N$$

多自由度系の各質点に s 次モードに比例する外力が作用している
とすると、その時の各次のベースシア ${}_s Q_B$ は式(8)により与えられる。

$${}_s Q_B = {}_s \bar{M} \cdot ({}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0) = \sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_s \beta \cdot {}_s u_i ({}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0) \quad \text{式 (8)}$$

${}_s \ddot{\Delta}$: s 次の代表加速度の建物応答成分

ここで、 s 次の等価質量 ${}_s \bar{M}$ は、式(9)で表せる。

$${}_s \bar{M} = \frac{(\sum m_i \cdot {}_s u_i)^2}{\sum m_i \cdot {}_s u_i^2} \quad \text{式 (9)}$$

また、各層の応答は刺激関数と代表変位を用いて式(10)のように表
せる。

$$\{ {}_s x \} = {}_s \beta \cdot \{ {}_s u \} \cdot {}_s \Delta \quad \text{式 (10)}$$

${}_s \Delta$: s 次の代表変位

式(10)を用いることで、式(11)、式(12)と表せる。

$$\sum m_i \cdot {}_s u_i = \frac{1}{{}_s \beta \cdot {}_s \Delta} \sum m_i \cdot {}_s x_i \quad \text{式 (11)}$$

$$\sum m_i \cdot {}_s u_i^2 = \left(\frac{1}{{}_s \beta \cdot {}_s \Delta} \right)^2 \sum m_i \cdot {}_s x_i^2 \quad \text{式 (12)}$$

これより、式(9)は、

$${}_s \bar{M} = \frac{(\sum m_i \cdot {}_s x_i)^2}{\sum m_i \cdot {}_s x_i^2} \quad \text{式 (13)}$$

と表せることになる。

つまり設計時、 s 次モードの外力分布を用いた静的荷重増分解析
により、各質点に働く外力 ${}_s P_i$ および相対変位 ${}_s x_i$ が得られる場合、
代表加速度は式(8)より、式(14)のように算出できる。

$$({}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0) = \frac{{}_s Q_B}{{}_s \bar{M}} = \frac{\sum m_i \cdot {}_s x_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_s x_i)^2} \cdot \sum_{i=1}^N {}_s P_i \quad \text{式 (14)}$$

一方、式(10)より、式(15)が得られる。

$${}_s \beta \cdot \{ {}_s u \} = \frac{1}{{}_s \Delta} \{ {}_s x \} \quad \text{式 (15)}$$

式(8)、式(13)および式(15)より、

$${}_s \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \frac{{}_s x_i}{{}_s \Delta} ({}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0)}{{}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0} = \frac{(\sum m_i \cdot {}_s x_i)^2}{\sum m_i \cdot {}_s x_i^2} \quad \text{式 (16)}$$

となる。よって、代表変位 ${}_s \Delta$ は式(16)から式(17)のように求めるこ
とができる。

$${}_s \Delta = \frac{\sum m_i \cdot {}_s x_i^2}{\sum m_i \cdot {}_s x_i} \quad \text{式 (17)}$$

この ${}_s \ddot{\Delta}$ と ${}_s \Delta$ はそれぞれ、式(7)の ${}_s \ddot{q}_0$ と ${}_s q_0$ に相当し、式(7)の運動

方程式を満たす。つまり、 s 次の固有角振動数 ${}_s \omega$ を用いて、

$${}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0 \approx {}_s \omega^2 \cdot {}_s \Delta \quad \text{式 (18)}$$

と示すことが出来る。

建物が弾性であるとき、 $|{}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0|$ および $|{}_s \Delta|$ の最大値は、適切に
仮定した減衰定数 ${}_s h$ を用いて求めた応答スペクトルの値、 S_a および
 S_d と一致する。 ${}_s \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0$ と ${}_s \Delta$ の関係を性能曲線と呼ぶ。非線形領域
においても、この性能曲線上の各点と原点を結んだ傾きは、等価な
角振動数の 2 乗となる。設計時に要求される加速度と変位の関係(つ
まり、加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルの関係)を定義
した場合、その原点との傾きもまた、周期の関数 (ω^2) となる。こ
の曲線が要求曲線である。式(18)より、性能曲線と要求曲線は比較
が可能であることがわかる。

3. 加速度計測値を用いた多質点系の性能曲線算出方法

多質点系建物の各層から得られる絶対加速度計測値を用い、等価
1 自由度系に縮約された、代表加速度 ${}_1 \ddot{\Delta} + \ddot{x}_0$ ー代表変位 ${}_1 \Delta$ 関係で
ある性能曲線の算出方法を示す。本研究では文献 10)と同様に、性能
曲線算出の際に必要な建物各層の変位は加速度計測値の 2 階積分に
より算出する。その際、Wavelet 変換により建物の振動性状におい
て支配的であると考えられる 1 次モード成分を抽出し、性能曲線の
算出を行うものとする。

3.1 Wavelet 変換の概要¹⁹⁾

Wavelet 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 $f(x)$ がいかに似通っているかを数学的に示す、時間周波数解析
の一つである。N 個のデータを持った信号 f_0 は式(19)に示す様に、
Wavelet 変換によって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。

$$f_0 = g_1 + f_1 \quad \text{式 (19)}$$

この操作を繰り返す行うことで、式(20)の通り分解できる。

$$f_0 = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n + f_n \quad \text{式 (20)}$$

この時、 i 番目の信号 g_i を Rank i の信号と呼ぶこととする。さら
に、 n はデータ数 N に依存し、式(21)より一義的に求まる。

$$n = \log_2 N \quad \text{式 (21)}$$

ここで、 f_n は確定値であり、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。

また、Wavelet 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 Δ_f と周波数軸上の幅 Δ_f の間には、数学的に式(22)に示す不
確定性関係がある。

$$2\Delta_f \cdot 2\Delta_f \geq 2 \quad \text{式 (22)}$$

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

$$\Delta_{t,i} = \Delta_t \times 2^i \quad \text{式 (23)}$$

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、

$$\Delta_{f,i} = \frac{1}{2\Delta_t \cdot 2^i} \quad \text{式 (24)}$$

である。つまり、Wavelet 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。

一方、文献 9)にあるように、FFT などを用いた従来手法により加速度計測値から変位を算出する際は、任意の計測波形に適用可能な時間軸における基線補正の一般的な方法がなく、周波数領域でのフィルターカットの境界を決定する等の検討が個別に必要である。一方、Wavelet 変換は、あらゆる加速度計測値に対して複数の周波数領域に時刻歴で分解が可能で、主要な Rank を選択することのみでモード分解が可能となる。

3.2 Wavelet 変換の適用

加速度計測値に Wavelet 変換を用いる目的は、加速度計測値に内在する長周期の計測誤差成分を取り除き 2 階積分により有意な変位波形を算出すると同時に、建物の振動特性上で支配的である 1 次モード成分を抽出することにある¹⁰⁾。1 次モード成分を抽出するに当たり、Wavelet 変換における各 Rank の周波数帯の境界をその固有周期の間に設定すれば、実建物の加速度計測値から 1 次モード成分を抽出することができる¹⁵⁾。この 1 次モード成分の Rank を主要 Rank とし、その主要 Rank の合計を 1 次モードの応答成分として扱う。主要 Rank の算定方法については、5.2 にて後述する。

実際の加速度計測値に Wavelet 変換を適用し、1 次モード成分を抽出した時の加速度の概要図を図 2 に示す。 $\ddot{x}_i$: i 層の絶対加速度、 $\ddot{x}_i$: i 層の相対加速度、 $\ddot{x}_0$: 地動加速度、 ${}_1\ddot{x}_i$: i 層の 1 次モード相対加速度成分、 ${}_1\ddot{x}_0$: 地動加速度の 1 次モード固有振動成分

(a) 計測された応答 (b) Wavelet 変換により抽出した応答

図2 加速度計測値に Wavelet 変換を用いた場合の概要図

計測される地動加速度 $\ddot{x}_0$ および各層の絶対加速度 $\{\ddot{x}_i\}$ は、Wavelet 変換を適用することで、図 2(b)の ${}_1\ddot{x}_0$ および ${}_1\ddot{x}_0 + {}_1\ddot{x}_i$ を得ることができる。

多質点系の基礎に対する相対変位は、相対加速度を 2 階積分することで式(25)のように得られる。

$${}_1x_i = \iint ({}_1\ddot{x}_0 + {}_1\ddot{x}_i) dt^2 - \iint {}_1\ddot{x}_0 dt^2 \quad \text{式 (25)}$$

算出された相対変位および相対加速度は Wavelet 変換を用いて 1 次固有周期の成分のみを抽出しているため、高次モードの成分は微小であり、応答値は 1 次モード成分として扱うことができる。

3.3 計測値を用いた場合の性能曲線算出

2)において、設計の場合には各自由度における代表加速度 ${}_s\ddot{\Delta} + \ddot{x}_0$ 、代表変位 ${}_s\Delta$ はそれぞれ式(14)、式(17)によって求まることを示した。本手法に用いる性能曲線は 1 次モード成分を想定しているため、式(14)および式(17)は、式(26)および式(27)へ書き換えることができる。

$$({}_1\ddot{\Delta} + {}_1\ddot{x}_0) = \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_1x_i)^2} \cdot \sum_{i=1}^N {}_1P_i \quad \text{式 (26)}$$

$${}_1\Delta = \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{\sum m_i \cdot {}_1x_i} \quad \text{式 (27)}$$

式(27)より、代表変位は式(25)より得られる各層の相対変位と各層の質量を用いることで容易に算出可能であることが分かる。

ここで、式(26)にある ${}_1P_i$ は、1 次の固有モードベクトルに比例した外力分布形である必要がある。ただし、加速度計測値を用いた場合、図 2(b)からも明らかな様に、地動成分である ${}_1\ddot{x}_0$ の値は各層で値が等しいのに対し、Wavelet 変換により抽出した各層の 1 次モードの相対加速度 ${}_1\ddot{x}_i$ は 1 次の固有モードベクトルに比例するため、この 2 成分の足し合わせである各層の絶対加速度 ${}_1\ddot{x}_0 + {}_1\ddot{x}_i$ は 1 次の固有モードベクトルに比例しない。そこで、1 次モードの刺激関数 ${}_1\beta \cdot \{ {}_1u \}$ を Wavelet 変換後の絶対加速度のうち地動加速度成分 ${}_1\ddot{x}_0$ のみに掛け、地動加速度を 1 次の固有モードベクトルに比例させる。これは、各層で要素が全て 1 のベクトル $\{1\}$ を持つ地動外力から、1 次の固有モードベクトルを抽出したことに相当する。これより、加速度計測値から 1 次の固有モードベクトルに比例した外力 ${}_1P_i$ を式(28)のように算出できる。

$${}_1P_i = m_i ({}_1\ddot{x}_i + {}_1\beta \cdot {}_1u_i \cdot {}_1\ddot{x}_0) \quad \text{式 (28)}$$

よって、計測値を用いた場合の代表加速度は式(28)を式(26)に代入することで、式(29)から求めることができる。

$$\begin{aligned} ({}_1\ddot{\Delta} + {}_1\ddot{x}_0) &= \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_1x_i)^2} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i + m_i \cdot {}_1\beta \cdot {}_1u_i \cdot {}_1\ddot{x}_0) \\ &= \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_1x_i)^2} \sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i + {}_1\ddot{x}_0 \end{aligned} \quad \text{式 (29)}$$

式(29)より、計測値を用いて代表加速度を算出する場合、代表加速度の相対加速度項のみを等価質量で除す必要があることが分かる。

なお、代表加速度および代表変位を算出する式(27)および式(29)には各層の質量 m_i が含まれるが、両式ともに分母・分子に同じ形で含まれているため、各層の質量の比率で代用可能である。用途が 1 つの様な建物では、例えば各層の床面積の比率などで代用できると考えられる。

ただし、応答変形が小さい範囲では、式(27)、式(29)を用いて実際に加速度計測値から代表加速度—代表変位関係である性能曲線を算出しても、有意な性能曲線が得られない。一例として、5.1 にて後述する多層鉄筋コンクリート造試験体の加速度計測値の主要 Rank 成分を用い、式(27)、式(29)から算出した性能曲線(Capacity Curve)を図 3 に示す。図 3 より、代表変位が小さい範囲で代表加速度の値が非常に大きくなっていることが確認できる。これは、実計測において応答変位の小さい範囲で各層の相対変位が 1 次モード系

に比例した分布形にならず、1 次の等価質量が極めて小さな値となることが原因である。

図3 計測値から算出した性能曲線

各層の変位が1次モード系に比例しない理由は、Wavelet 変換によって完全に切り除くことができなかった計測ノイズなどが、2 階積分により誤差成分の変位となったためと考えられる。この誤差成分は建物の振動中も常に一定の割合で存在するため、建物の応答が小さい時に、計測変位における誤差成分の割合が相対的に大きくなる。

計測値を用いた場合のこの誤差を回避して有意な性能曲線を算出するために、仮の代表変位を式(30)、仮の代表加速度を式(31)の通り算出し、仮の代表加速度一仮の代表変位関係を仮の性能曲線と定義する。

$${}_1\Delta' = {}_1\Delta \cdot \frac{{}_1\bar{M}}{M} = \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i}{\sum m_i} \quad \text{式 (30)}$$

$$({}_1\ddot{\Delta}' + {}_1\ddot{x}_0) = \left({}_1\ddot{\Delta} \cdot \frac{{}_1\bar{M}}{M} + {}_1\ddot{x}_0 \right) = \frac{\sum m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i}{\sum m_i} + {}_1\ddot{x}_0 \quad \text{式 (31)}$$

これら 2 式はそれぞれ式(27)、式(29)の地動成分以外に対して等価質量比(等価質量の全質量に対する比)を掛けたことに相当する。算出の際に等価質量を用いないため、図 3 の様な原点付近での誤差が生じない。ただし、仮の代表加速度の地動項には等価質量比が掛かっていないため、仮の性能曲線の傾きは 1 次の固有周期と完全には一致しないことになる。

上記の仮の性能曲線を用い、真の性能曲線を算出する方法を以下に示す。

- (1) 加速度計測値と各層の質量(質量比)から仮の性能曲線を算出する。
- (2) 仮の性能曲線から骨格曲線を算出する。ここで骨格曲線は、振動中にそれまでの最大変形を更新する点のみを逐次抽出して結んだ応答曲線とする⁹⁾
- (3) (2)にて算出した骨格曲線上の各点について等価質量比を算出し、その値で仮の性能曲線の代表加速度うちの地動成分以外、および代表変位を除す。

以上の方法より、判定に用いる性能曲線を算出できる。

3.4 計測値を用いた場合の要求曲線との比較

性能曲線と比較するための要求曲線の算出には、その建物の基礎部で計測された地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ を用いる。性能曲線の代表加速度には、

地動加速度成分として地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ ではなく、Wavelet 変換を適応した ${}_1\ddot{x}_0$ を用いる。そのため、性能曲線と要求曲線では、地動加速度成分が異なることとなる。しかし、性能曲線の算出には計測された地動加速度から建物の応答に影響を及ぼす周期成分を取り出しているに過ぎない。つまり、地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ と ${}_1\ddot{x}_0$ に Wavelet 変換を適応した ${}_1\ddot{x}_0$ のどちらから要求曲線を算出しても、建物の 1 次固有周期帯において、要求曲線の値に大きな差異はない。

5.にて後述する振動台実験で計測された地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ (Original)および主要 Rank の地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ (Rank6+7+8+9)を用いて要求曲線を算出し比較を行った結果を図 4 に示す。要求曲線の算出に用いた減衰定数は 3% である。なお、図 4 には Wavelet 変換に用いた各 Rank のナイキスト周期を同時に示している。図 4 から主要 Rank としての Rank6~Rank9 の範囲において要求曲線が概ね一致していることが確認できる。一方、主要 Rank の範囲外とした Rank5 付近では両要求曲線に差が見られるが、建物の 1 次固有周期より短い周期帯であり、この範囲で性能曲線と要求曲線が交わることはないと考えられるため、計測された地動加速度 ${}_1\ddot{x}_0$ から算出する要求曲線を用いて判定可能であると言える。

図4 要求曲線の比較

3.5 復元力特性モデル算出

建物の残余耐震性能を判定する性能曲線の特性をより適切に評価するために、文献 10)で提案されている方法により負勾配まで考慮した一般的な 4 折れ線の復元力モデルへの近似を行う。方法については文献 10)に詳しいため、ここではその各折れ点の変位と耐力の算出方法のみを以下の(1)~(4)に示す。なお、各折れ点はそれぞれ、ひび割れ点(第 1 折れ点)(δ_c, F_c)、降伏点(第 2 折れ点)(δ_y, F_y)、最大耐力点(第 3 折れ点)(δ_{Fmax}, F_{max})および最大変形点(δ_u, F_u)を想定したものである。復元力特性モデル算出の概要図を図 5 に示す。

- (1) ひび割れ点は、原点と最大耐力の 1/4 耐力に相当する性能曲線上の点を直線で結んだ線(この傾きを初期剛性とする)上であり、第 2 折れ点の 1/3 耐力点とする。
- (2) 降伏点は、第 3 折れ点を通り初期剛性の 1/1000 の傾きを持った直線上とする。この時、モデル化前の最大耐力点までの性能曲線と等価なエネルギー吸収能力を持つ様に降伏点を定める。
- (3) 第 3 折れ点は最大耐力点とする。
- (4) 最大変形点は、算出された代表変位の最大値を最大変形点の変形とし、

耐力は、最大耐力点以降の性能曲線のエネルギー吸収能力が等価になるように決定する。

なお、最大耐力点と最大変形点と同じ場合は、3折れ線の復元力モデル、最大耐力点と最大変形点異なる場合は、4折れ線の復元力モデルとなる。

図5 復元力特性モデル算出の概要図

4. 動的解析結果を用いた性能曲線算出手法の妥当性検証

ここでは、3.における提案手法により算出した性能曲線の傾きが、1次の固有周期を表し、要求曲線と比較可能であることを確認する。等価1自由度系における余震での最大応答点を精確に求めるためには、要求曲線と比較する際に、性能曲線の傾きが建物の固有周期と一致する必要がある。本検討では、周期の確認が明確な動的弾性解析結果を用いて検証を行う。なお、非線形領域については、5.にて別途検討する。

4.1 解析概要

入力地震動は2011年3月11日に宮城仙台でK-NETにより観測された地震波MYG013NSとした。解析対象は1次モードの等価質量が小さくなるように各層の剛性を変化させた2質点のせん断多質点系モデルであり、解析は弾性解析である。解析時間刻みは0.01秒、減衰は初期剛性比例型とし、3%と設定した。各層に設定した質量、剛性を表1に示す。表2には、固有値解析から得られたモデルの1次および2次の固有周期、固有モードベクトル、および質量と固有モードベクトルから算出した等価質量比を示す。

表1 解析パラメータ

	質量	剛性
1F	490 kN	147kN/cm
2F	490 kN	29.4 kN/cm

表2 固有値解析結果

		1次モード	2次モード
固有ベクトル	1F	0.22	固有ベクトル
	2F	1.15	
固有周期		0.91sec	0.33sec
等価質量比		0.69	0.31

なお、2次の等価質量比が大きくなるようなモデルを作成した理由は、高次の応答成分が含まれる計測結果から、Wavelet変換によって1次モード成分を抽出できることを確認するためである。

4.2 解析結果からの性能曲線の算出

動的解析の結果から1次モード成分を抽出し、式(27)、式(29)を用いて算出した性能曲線を図6に示す。また、図6には、解析モデルの固有値解析より得られた1次の固有周期の傾きを持つ直線を同時に示す。図6から、履歴曲線の傾きと1次固有周期の傾きが一致していることが確認できる。

図6 性能曲線（動的解析）

以上より、3.3にて示した性能曲線算出式の妥当性、およびWavelet変換を用いることで複数モードが含まれた加速度から1次モード成分が抽出可能であることが確認できた。

5. 実計測記録を用いた性能曲線の精度検証

本章では、既往の多層建物の振動台実験結果^{21)~25)}から得られる加速度計測値を用い、本稿で提案する方法により性能曲線が算出できることを確認する。

5.1 試験体概要

検討対象の試験体は、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記録^{21)~25)}（以下、実大3層と呼ぶ）である。ここでは試験体の概要を示すが、詳細は参考文献を参照されたい。図7に実大3層の試験体寸法および表3に試験体諸元を示す。

表3 試験体概要(実大3層)^{21)~25)}

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

図7 試験体図面 (実大3層) 21)~25)

実大3層試験体の入力地震動は八戸EW波の最大加速度を600galに基準化した地震波である。加速度の計測には共和電業株式会社のAS-5GB(動歪型)の加速度計を用い、各層中央部にて計測を行っている。なお、加速度計測値の時間刻みは0.005secである。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 21)~25)。

5.2 主要 Rank の算定

主要 Rank の算定は、計測加速度の伝達関数から建物の周期帯を推定し、その周期帯と各 Rank の仮の性能曲線の相関性により行う。実大3層の地動加速度に対する最上階加速度の伝達関数を図8に、Rank5からRank10までの各 Rank の仮の性能曲線を図9に示す。両図では、各 Rank のナイキスト周期を破線で示す。

図8から、周期1.45secに伝達関数のピークが見られ、試験体の固有周期がRank7からRank8の間であることが分かる。図9のRank6からRank8の仮の性能曲線から、代表加速度と代表変位には強い相関関係があることが分かる。その他にもRank9の仮の性能曲線では、Rank8の周期帯で振動していることが見て取れる。これより、Rank6およびRank9にも試験体の1次固有周期成分が含まれていると考えられる。一方、Rank5およびRank10は値が小さいことに加え、Rank7やRank8とは異なる周期で振動している。以上を勘案し、実大3層試験体の主要 Rank をRank6~Rank9の足し合わせとする。

図8 伝達関数 (実大3層)

図9 各 Rank の性能曲線 (実大3層)

5.3 加速度計測値からの性能曲線算出

5.2で算定した主要 Rank の加速度計測値を用いて性能曲線の算出を行う。本手法を用いて算出した実大3層試験体の性能曲線、仮の性能曲線(Assumed Capacity Curve)および骨格曲線(Skeleton Curve)を図10に示す。

3.5で述べた手法により図10に示した性能曲線を復元力モデル化した結果を図11にモデル化前の性能曲線とともに示す。図11から、算出した復元力特性モデルは、元の性能曲線の特徴を良く捉えていることが確認できる。

以上より、残余耐震性能判定に用いる多質点建物の性能曲線を加速度計測値のみから算出できることが示された。

6. まとめ

リアルタイム残余耐震性能判定装置の実用化を視野に入れ、1自由度系における性能曲線の算出方法を多自由度系に拡張する方法を定式化し、その有効性を弾性地震応答解析および既往の振動台実験結果を用いて検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1). 多層建物の加速度計測値から1次モードの性能曲線を算出する方法を提案し、その性能曲線が要求曲線と比較可能であることを示した。
- 2). 多質点系の動的解析結果を用い、提案する手法で算出された性能曲線の妥当性を確認した。
- 3). 振動台実験から得られた多層建物の各層の絶対加速度計測値を用い、性能曲線算出とモデル化の方法が妥当であることを示した。

謝辞

日本大学の北嶋圭二准教授には、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。

本論文では、防災科学技術研究所の地震観測網(K-NET)の観測記録を利用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

図10 性能曲線（実大3層）

図11 性能曲線と復元力特性モデル（実大3層）

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 中村充、竹脇出、安井譲、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
- 7) 中村充、安井譲：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
- 8) 山口真矢子、倉田真宏、中島正愛：事前解析に基づく分類器を利用した鋼構造建物の損傷検知システムの開発，日本建築学会近畿支部研究報告集 構造系(52)，pp.93-96，2012.5
- 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) 川村 学、楠 浩一他：加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出方法に関する研究 1 質点系構造物の場合，日本建築学会構造系論文集，第688号，pp.1061-1069，2013.06
- 11) 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，pp.1057-1062，2006
- 12) 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，pp.1039-1044，2007
- 13) 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，pp.895-900，2009
- 14) 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，pp.925-930，2010
- 15) 日向大樹、楠浩一、田才晃、川村学：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，コンクリート工学年次論文集，35巻2号，pp.931-936，2013
- 16) 倉本 洋、勅使川原正臣、小鹿紀英、五十田博：多層建築物の等価1自由度縮約方法と地震応答予測精度，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp.75-85，2001.8
- 17) 国土交通省住宅局建築指導課他：2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説，工学図書株式会社，2001
- 18) 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耐震性能評価ガイドライン，技法堂出版，2000.07
- 19) 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
- 20) 柴田明徳：最新耐震構造解析<第2版>，森北出版，2003
- 21) 小野口雅美他、宮下真一、楠 浩一、中埜良昭：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その1，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 構造IV，pp.707-708，1995.8
- 22) 井出知良、中江晃彦、阿満重幸、隈澤文俊：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 構造IV，pp.709-710，1995.8
- 23) 小駒 勲、豊島 学、林田敏弘、箕輪親弘：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その3，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 構造IV，pp.711-712，1995.8
- 24) 阿満重幸、北嶋圭二、細矢 博、江戸宏彰：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その4，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 構造IV，pp.713-714，1995.8
- 25) 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

(2013年11月7日原稿受理，2014年2月21日採用決定)