

論文 加速度計を用いて作成した建物の性能曲線の精度検証

茜 絢也^{*1}・松本 裕史^{*2}・楠 浩一^{*3}・田才 晃^{*4}

要旨：地震時に、建物に設置した加速度計の計測値のみから多自由度系応答を1自由度に縮約し作成した慣性力性能曲線の精度検討を目的に、加速度計設置数をパラメータとして弾性および弾塑性解析を実施し、降伏時周期、最大変形時周期、および塑性率について検討した。その結果から、加速度計設置数は、性能曲線の推定精度の影響因子となることが分かった。

キーワード：性能曲線、加速度計測、等価1自由度系、応急危険度判定、余震

1. はじめに

大地震時には多くの建物が被災し、その結果多くの避難民を生むこととなる。余震による2次被害を低減するとともに、避難民の数を減らすためには、本震後の迅速な応急判定方法の確立が不可欠である。そこで本研究では、各建物に安価な加速度センサーを配置し、その加速度センサー計測値から、機械的に建物の地震時に応答を計測し、地震後の建物の残余耐震性能をリアルタイムで判定する技術の確立を目的としている(文献1,2, 参照)。この技術の確立により、本震直後には建物の安全性を住民に表示することが可能となる。本装置は、地震時の建物の応答と入力地震動を加速度計によって計測し、残余耐震性能、つまりどの程度の余震にまで建物が耐えうるかを瞬時に表示する。本論文では、加速度センサーの計測値のみから作成された性能曲線の精度について解析的に検討した。

性能曲線とは、建物の等価荷重-等価変位関係である(文献3 参照)。詳細は文献3 によるが、これは図-1 では、復元力性能曲線に相当し、加速度計の計測値のみからでは作成できない。これに対し、本論文で述べる加速度計の計測値のみから作成できる性能曲線とは、図-1 中の

慣性力性能曲線である。

ここで、性能曲線から等価1自由度系での、塑性率(以下、 μ)は式(1)で計算できる。

$$\mu = \frac{Q_y \cdot \delta_{max}}{Q_{max} \cdot \delta_y} \quad (1)$$

(1)式を周期で表すと

$$\mu = \frac{Q_y \cdot \delta_{max}}{Q_{max} \cdot \delta_y} = \frac{T_{max}^2}{T_y^2} \quad (2)$$

となる。

ここで T_y は降伏時周期、 T_{max} は最大変形時周期である。 μ を正しく評価するには、 T_y と T_{max} が加速度計の計測値から精度良く推定できる必要がある。

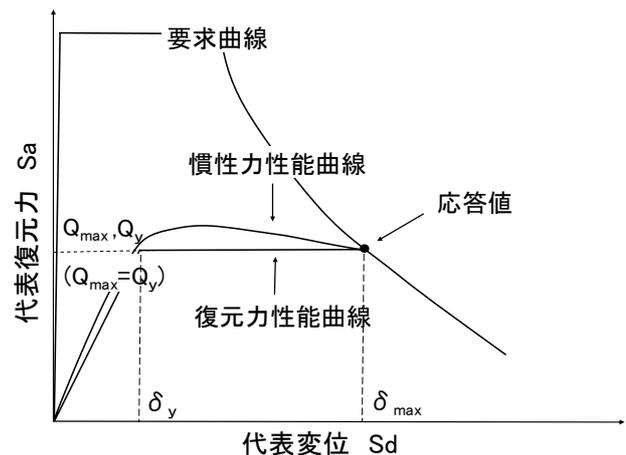


図-1 性能曲線の概略図

*1 横浜国立大学 大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学 工学部 建築学専攻 (仮会員)

*3 横浜国立大学 工学研究院 システムの創作部門 准教授 博(工) (正会員)

*4 横浜国立大学 工学研究院 システムの創作部門 教授 工学博士 (正会員)

本論文では、慣性力性能曲線と復元力性能曲線の T_y, T_{max} , および式(2)により算出される μ を比較し検討を行う。

2. 1 自由度への縮約方法

本論文では文献 1 で示されている等価 1 自由度縮約法を用いる。計測された加速度値から算出した建物各層の相対応答変形量 $\{Mx\}$ が建物の唯一のモード形を表していると仮定する。本仮定から計測されたモードの刺激係数 $M\beta$, モード形 $\{Mu\}$, および代表変位 Δ を用いると

$$\{Mx\} = M\beta \cdot \{Mu\} \cdot \Delta \quad (3)$$

と表せる。また、1 層の層せん断力 MQ_B は、各層で計測された絶対加速度 $\{M\ddot{x} + \ddot{x}_0\}$ および各層の質量 m_i を用いて、慣性力として

$$MQ_B = \sum m_i \cdot (M\ddot{x}_i + \ddot{x}_0) \quad (4)$$

と算出できる。1 層せん断力を代表復元力 S とすると、建物全体に対する多質点系運動方程式は、次式のように 1 自由度に縮約することができる。

$$M \cdot \ddot{\Delta} + M\tilde{C} \cdot \dot{\Delta} + M\tilde{K} \cdot \Delta = -M \cdot \ddot{x}_0 \quad (5)$$

(M : 建物の全体質量, $M\tilde{C}$: 等価な減衰, $M\tilde{K}$: 等価な剛性 \ddot{x}_0 : 地動加速度) である

$$S = MQ_B = M \cdot \ddot{\Delta} \quad (6)$$

である。また式(3)より

$$M\beta \cdot M u_i = \frac{M x_i}{\Delta} \quad (7)$$

と表せる。式(3), (7)を用いると各階に作用している慣性力 $M P_i$ は

$$M P_i = m_i \cdot M\beta \cdot M u_i \cdot \ddot{\Delta} = m_i \cdot \ddot{\Delta} \cdot \frac{M x_i}{\Delta} \quad (8)$$

と計算される。また、全体質量 M は式(6), (8)を用いると

$$\begin{aligned} M &= \frac{MQ_B}{\ddot{\Delta}} = \frac{\sum m_i \cdot \ddot{\Delta} \cdot \frac{M x_i}{\Delta}}{\ddot{\Delta}} \\ &= \frac{\sum m_i \cdot M x_i}{\Delta} = \sum m_i \end{aligned} \quad (9)$$

となる。よって代表変位 Δ は

$$\Delta = \frac{\sum m_i \cdot M x_i}{\sum m_i} \quad (10)$$

と算出される。 $\dot{\Delta} = 0$ の時

$$S = \frac{MQ_B}{M} = \ddot{\Delta} \quad (11)$$

が成り立つ。

慣性力性能曲線と復元力性能曲線の関係を図-2に示す。

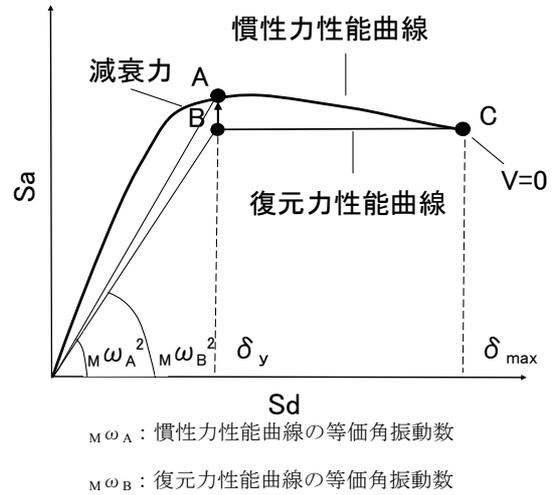


図-2 両性能曲線の関係図

図-2に示すように、慣性力性能曲線には速度 (V) に依存した減衰力(図中 A-B 間)が働くため、復元力性能曲線とは一致しない。この時、慣性力性能曲線は $V=0$ となる C 点 (δ_{max}) で復元力性能曲線と一致する。ここで、両性能曲線上において、等価角振動数 $M\omega$ を式(12)のように定義する。

$$S_a = M \omega^2 \cdot S_d \quad (12)$$

式(12)の $M\omega$ を用いて T_y, T_{max} を算出する。

3. 解析モデルとパラメータ

建物モデルは 1 次モードが卓越する 3, 5, 7, 9 質点せん断系モデルとした。表-1 に示すように等価質量比が概ね 80% 以上となっており、1 次モードが卓越している。各層質量は 50ton, 階高は全層 3m, 外力分布形は逆三角形分布とした。ベースシヤール係数は 0.3, 降伏時層間変形角を 1/150, 各層の復元力特性には鉄筋コンクリート造を想定して武田モデルを用いた。ひび割れ時

耐力は降伏時耐力の 1/3 とした。また、3 次勾配は初期剛性の 1/1000 倍としている。これらの設定は全モデルで共通項である。

建物のパラメータは、建物階数、剛性の分布、崩壊形である。剛性分布は初期剛性を全層等しくしたケースと、上層にいくに従い低下させたケースの 2 種類である。初期剛性を全層等しくしたケースは降伏時剛性低下率(αy)を $\alpha y = 0.25$ 、上層で低下させたケースは $\alpha y = 0.5$ とした。また、崩壊形は全層が降伏するモデル(以下、全層降伏モデル)に加えて、1 層での崩壊形を想定して 2 層以上を弾性としたピロティ建物(以下、ピロティ型モデル)とした。固有値解析結果から得られた各モデルの 1 次固有周期および、等価質量比を表-1 に示す。また、性能曲線の作成時には 2 つのケースを考え、全層の加速度値を使用し、等価 1 自由度に縮約したケース(以下、全層計測モデル)、加速度計の数をパラメータとして、設置階以外の加速度値を上下設置階での加速度値から線形補完し求めたケース(以下、線形補完モデル)とした。線形補完モデルで加速度計を設置した階、および使用した入力地震波を表-2 に示す。全層降伏型モデルは全地震波を入力したが、ピロティ型モデルでは神戸、El centro、wg60 のみとした。また、等価粘性減衰定数を 5% とし、瞬間剛性比例型モデルを用いた。

表-1 各モデル 1 次固有周期(sec)

階数	($\alpha y=0.5$)		($\alpha y=0.25$)	
	1次固有周期	等価質量比(%)	1次固有周期	等価質量比(%)
3	0.52	85.7	0.34	91.7
5	0.63	81.8	0.41	87.8
7	0.73	80.0	0.47	86.3
9	0.82	78.9	0.53	85.4

表-2 加速度計設置階および使用地震波

階数	設置階	略称	A_{max} (cm/s ²)	継続時間(S)
3F	2、屋上	神戸(NS)	818	150.0
		屋上		
5F	2、4、屋上	El centro(NS)	342	53.6
		八戸(NS)	225	71.9
	3、屋上	告示波wg60	581	120.0
		告示波wg61	561	120.0
7F	2、4、6、屋上	告示波wg62	648	120.0
		告示波wg63	612	120.0
	2、5、屋上	告示波wg64	525	120.0
		4、屋上	告示波wg65	548
9F	2、4、6、8、屋上	告示波wg66	575	120.0
		告示波wg67	601	120.0
	2、4、7、屋上	告示波wg68	570	120.0
		4、7、屋上	告示波wg69	568

4. 解析結果と結果の検討

4.1 性能曲線算出例

前項の式(10)、(11)を用いて作成した両性能曲線の骨格曲線の一例を図-3 に示す。ここでいう骨格曲線とは、振動中にこれまでの最大変形に達した点を抽出して結んだ線である。この骨格曲線を用いて検討する。代表加速度として、復元力性能曲線では地震応答解析により計算された 1 層せん断力、慣性力性能曲線は式(11)を用いる。代表変位はともに式(10)で求める。

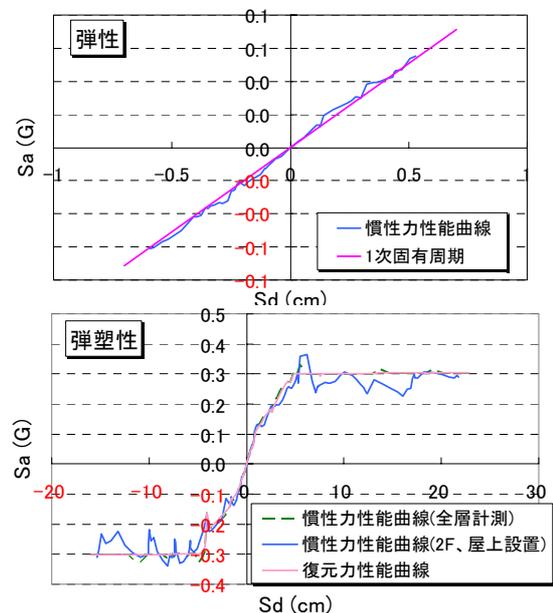


図-3 性能曲線算出例 ($\alpha y=0.5$, wg63 入力)

4.2 弾性解析

入力地震波の最大加速度を 20gal として弾性解析を行った。図-4 に弾性解析結果から得られた全ケースでの慣性力性能曲線の弾性周期と 1 次固有周期 T_1 の関係を示す。

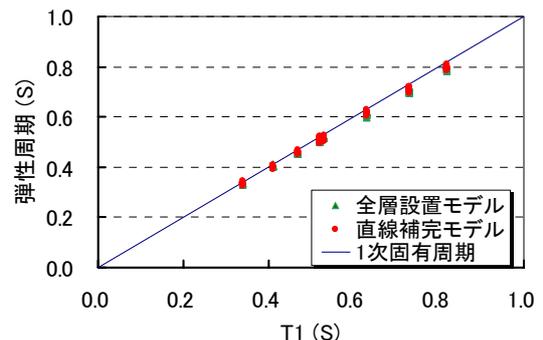


図-4 弾性周期の比較

ここで、弾性周期は骨格曲線を直線近似して算出した。全層計測モデル、線形補完モデルともほぼ T_1 と一致している。線形補完モデルとした場合も、弾性時の周期を算出できることが分かる。

4.3 弾塑性解析

次に入力地震波のレベルを原波相当とし、弾塑性解析を行った。

4.3.1 T_y の検討

検討では、復元力性能曲線の降伏点は、いずれかの層の復元力が、設定した降伏耐力に達した点とした。また、慣性力性能曲線の降伏点は、復元力性能曲線での降伏時の解析ステップを用いて設定した。各解析ケースに対して算出した T_y を図-5 に示す。

図-5 から、全層計測モデルでは慣性力性能曲線の T_y は、復元力性能曲線での T_y とほぼ一致している。全体的に慣性力性能曲線の T_y は、復元力性能曲線での T_y に比べ、若干周期が短くなっている。これは減衰力が影響し、図-2 に示すように慣性力が復元力を上回ったため、周期が短く評価されたと考えられる。しかし、図-5 から、慣性力性能曲線でも、 T_y は十分推定可能であると言える。

線形補完モデルでは全層計測モデルに比べばらつきがみられる。3F 線形補完モデルでは屋上レベルのみに加速度計を設置した場合、 T_y が長く評価された。これらのモデルでは、図-6 に示すように、まず 1F が最初に降伏し、変形が 1F に集中していた(図中 A)。しかし、屋上と地上レベルの線形補完では、この時点で 1F はまだ、実際の降伏変形角に至っていないことがある(図中 B)。その結果、屋上と地上レベルの線形補完において、1 層せん断力を過小評価してしまう。ここで、式(12)より S_a-S_d 曲線上の任意の点と原点を結ぶ直線の勾配が緩やかなほど、周期は長く評価される。そのため、変形を大きく、耐力を低く評価すると、周期は長く評価される。屋上と地上レベルの線形補完では、代表変位を小さく評価したが、耐力を過少評価した

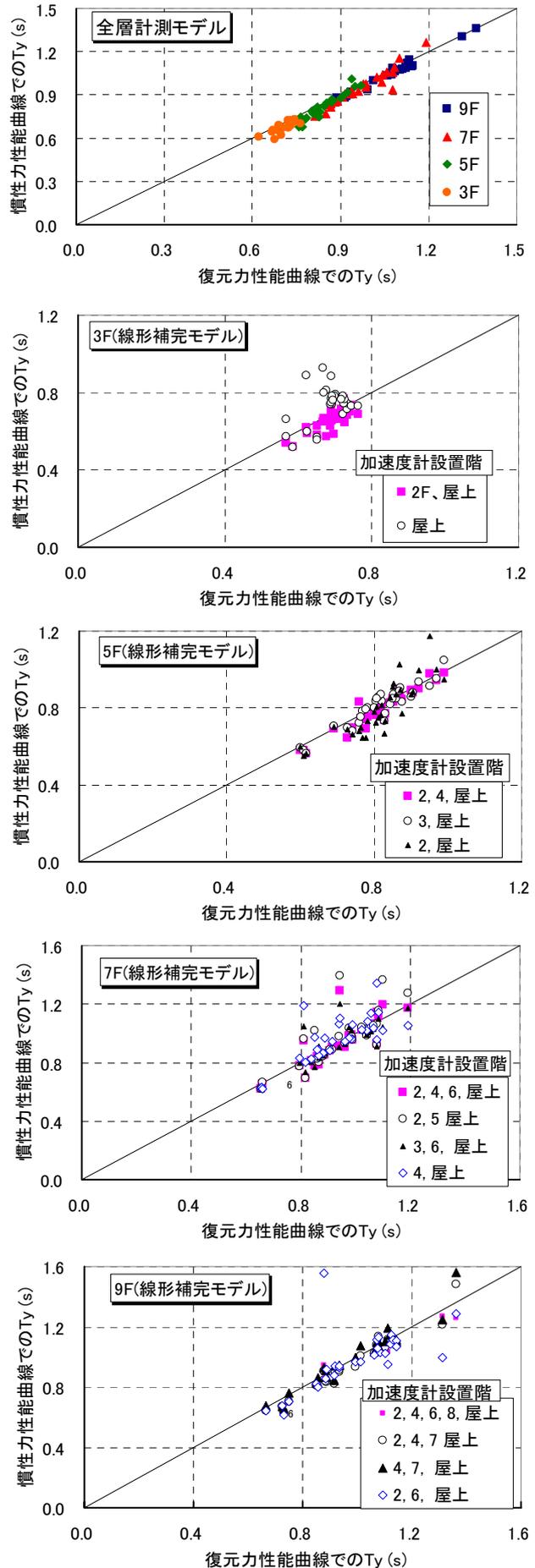


図-5 T_y の比較

影響の方が大きかったため、 T_y が長く評価されたと考えられる。一方、5F・7F 線形補完モデルでは概ね良好な結果となっている。しかし、特に7F モデルでは図-5 中に示したように、周期が長く評価されたものもある。これらは全て α_y を 0.5 としたものであり、上層にいくに従い初期剛性が低下するモデルである。そのため、これらは最初に屋上レベルが降伏耐力に達していた。その結果、図-7 に示すように上層部を抜いた線形補完の代表変位は、実際の代表変位を上回っていることになる。そのため、 T_y は長く評価された。上層にいくに従い剛性が低下する 5・7F モデルにおいて、精度良く代表変位を算出するためには、上層部に加速度計をおく必要があると考えられる。9F 線形補完モデルは概ね良好な対応を示したが、大きくはずれている点は設置間隔を最大としたモデルであった。以上より、加速度計の数を減らすことは、 T_y の評価で大きな誤差を伴う可能性があると言える。

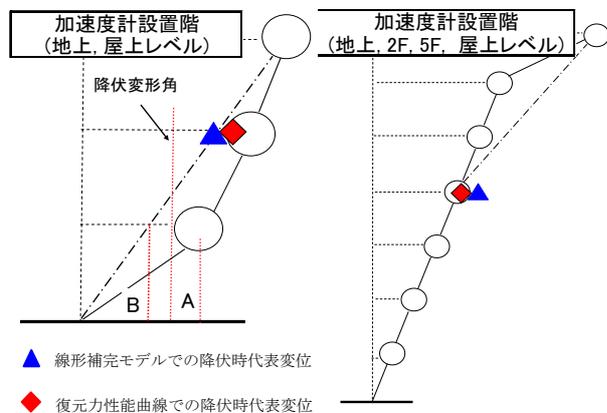


図-6 降伏時振動系例 (3F モデル) 図-7 降伏時振動系例 (7F モデル)

4.3.2 T_{max} の検討

全層計測モデルの慣性力性能曲線と復元力性能曲線の T_{max} を図-8 に示す。両者の周期は良好に一致している。これは図-2 に示したように、 δ_{max} で $V=0$ となり、復元力と慣性力がほぼ等しくなったためと考えられる。

線形補完モデルでの復元力性能曲線の T_{max} に対する慣性力性能曲線の T_{max} との比率を求め、それぞれの、最大値、平均値、最小値を表-4 に

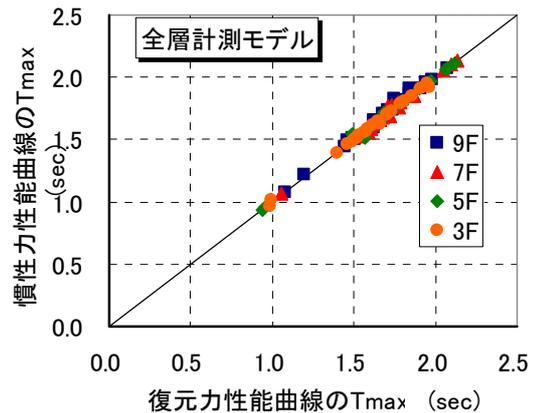


図-8 T_{max} (全層計測モデル)

表-4 T_{max} (線形補完モデル)

階数	設置階	(最大値) ^{※1}	(平均値) ^{※2}	(最小値) ^{※3}
3F	2、屋上	1.06	1.00	0.94
	屋上	1.33	1.01	0.88
5F	2、4、屋上	1.17	1.01	0.95
	3、屋上	1.21	1.03	0.89
7F	2、屋上	1.59	1.04	0.84
	2、4、6、屋上	1.18	1.02	0.97
	2、5、屋上	1.36	1.05	0.94
	3、6、屋上	1.19	1.01	0.94
9F	4、屋上	1.40	1.04	0.93
	2、4、6、8、屋上	1.16	1.03	0.97
	2、4、7、屋上	1.22	1.05	0.91
	2、6、屋上	1.19	1.02	0.90
		1.54	1.10	0.95

※1 T_{max1}/T_{max2} の最大値 ※2 T_{max1}/T_{max2} の平均値

※3 T_{max1}/T_{max2} の最小値 T_{max1} : 慣性力性能曲線での T_{max}
 T_{max2} : 復元力性能曲線での T_{max}

全モデルとも平均値はわずかに 1.0 を上回る程度となり、概ね復元力性能曲線の T_{max} と一致している。しかし、表-4 に示した T_{max} の比率の最大値および最小値から、建物階数によらず、加速度計の設置数を少なくすると、 T_{max} の誤差が大きくなる傾向があると言える。建物階数による顕著な違いはみられず、 T_{max} の推定精度は加速度計の設置数が重要な影響因子であるといえる。

4.3.3 μ の検討

全層計測モデルについて式(2)を用いて求めた μ を図-9 に示す。ここで μ_1 は慣性力性能曲線から算出した μ 、 μ_2 は復元力性能曲線から算出した μ である。また、各解析モデルにおける、塑性率の比(μ_1/μ_2)の最大値、平均値、最小値、並びに $\mu_1 > \mu_2$ となった解析ケース数の全解析ケース数に対する割合を全層計測モデルについて表-5 に、線形補完モデルについて表-6 に示す。

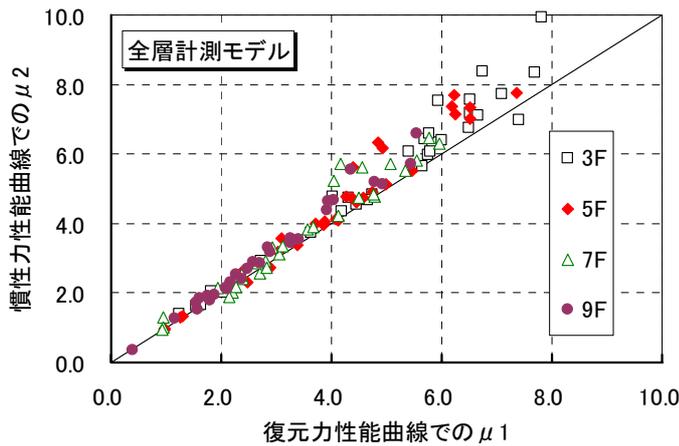


図-9 μ の比較 (全層計測モデル)

全層計測モデルでは、全てのモデルの 80%以上が $\mu_1 > \mu_2$ となった。これは、慣性力性能曲線では T_{max} がほぼ一致していたことから、慣性力性能曲線の T_y が復元力性能曲線の T_y に比べ、短く評価されたためと考えられる。 μ_1/μ_2 の最大値、平均値、最小値とも、建物階数による顕著な違いはみられなかった。

線形補完モデルでは、3, 5, 7F モデルの加速度計の設置間隔が最も大きいモデルで、 μ_1/μ_2 のばらつきが大きくなった。線形補完モデルと全層設置モデルを比較すると、 μ_1/μ_2 の平均値に顕著な違いはみられない。しかし、同じ階数のモデルについて、線形補完モデルの全パターン

表-5 全層計測モデルでの μ

階数	設置階	$\mu_1 > \mu_2$ ※1	(最大値)※2	(平均値)※3	(最小値)※4
3F	全層	93.750	1.270	1.086	0.945
5F	全層	84.375	1.303	1.077	0.938
7F	全層	82.759	1.367	1.095	0.882
9F	全層	82.143	1.277	1.078	0.861

表-6 線形補完モデルでの μ

階数	設置階	$\mu_1 > \mu_2$ ※1	(最大値)※2	(平均値)※3	(最小値)※4
3F	2、屋上	84.38	1.46	1.11	0.89
	屋上	28.13	1.97	0.95	0.40
5F	2、4、屋上	75.00	1.47	1.10	0.79
	3、屋上	65.63	1.62	1.08	0.88
7F	2、屋上	68.75	2.48	1.20	0.62
	2、4、6、屋上	80.65	1.38	1.08	0.63
	2、5、屋上	67.74	1.84	1.10	0.82
	3、6、屋上	70.97	1.59	1.07	0.54
9F	4、屋上	61.29	1.96	1.05	0.40
	2、4、6、8、屋上	96.67	1.35	1.14	0.86
	2、4、7、屋上	90.00	1.52	1.19	0.94
	4、7、屋上	63.33	1.37	1.05	0.71
	2、6、屋上	80.00	2.07	1.34	0.76

※1 $\mu_1 > \mu_2$ をとる復元力性能曲線に対する慣性力性能曲線の個数の割合

※2 μ_1/μ_2 の最大値 ※3 μ_1/μ_2 の平均値

※4 μ_1/μ_2 の最小値

μ_1/μ_2 の最大値、最小値は、全層設置モデルの μ_1/μ_2 の最大値、最小値に比べ、大きく評価した。このことから、加速度計の設置数を減らすことは、 μ の推定精度を下げることになると言える。

5. まとめ

加速度計の計測値のみから作成した慣性力性能曲線の、復元力性能曲線に対する推定精度を T_y, T_{max}, μ について検討するため、加速度計設置数をパラメータとした弾性および、弾塑性解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 弾性解析において、全層計測モデル、線形補完モデルとも、等価周期はほぼ 1 次固有周期と一致した。
- (2) 全層計測モデルの T_y は、減衰力の影響で復元力性能曲線の T_y に比べ、若干短く評価された。
- (3) 全層計測モデルの T_{max} の推定精度は、良好な結果となった。
- (4) 加速度計の数を減らすことは、 T_y を長く評価する傾向があった。又、 T_{max} の評価で大きな誤差を伴う可能性があると言える。
- (5) 加速度計の数を減らすことは、 μ の推定精度を下げる可能性があると言える。

参考文献

- 1) 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ための加速度積分法，日本建築学会構造系論文集，No569, pp.119-126, 2003.7
- 2) 楠浩一、勅使川原正臣，小出栄治：リアルタイム残余耐震判定装置の開発 その1 判定方法の概要，日本建築学会学術講演梗概集，pp.961-962, 2003.9
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説，pp.110-112, 2004.1