

論文 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

楠 浩一^{*1}・勅使川原 正臣^{*2}

要旨：数個の安価な加速度計から建物の性能曲線と本震の要求曲線を計測・比較することにより建物の残余耐震性能をリアルタイムに判定する装置を開発するためには、本震で損傷を受けた建物が余震で応答する際の等価減衰定数を精度よく推定する必要がある。そこで、1質点系モデルにおいて、計40,500ケースの弾塑性解析を実施し、等価減衰定数とそれに伴う5%減衰での弾性スペクトルに対する建物の応答低減率の推定式を提案した。

キーワード：等価粘性減衰定数, 余震, 要求曲線, 限界耐力計算

1. はじめに

地震発生時に既存構造物に設置した加速度計で観測された加速度記録から、構造物の性能曲線と地震の要求曲線を計算し、両者を比較することにより、構造物の本震後の残余耐震性能を自動的に判定する装置の開発¹⁾は、余震による二次被害軽減のためにも急務である。

性能曲線²⁾とは、建物の主要な振動モードを取り出し、それを1質点系に縮約したものであり、縦軸は1自由度系に縮約された復元力(代表復元力)、横軸は1自由度系に縮約された変位(代表変位)となる。一方、要求曲線²⁾とは、縦軸に加速度応答スペクトルの縦軸の値、横軸に変位応答スペクトルの縦軸の値をとったものである。

図-1に構造物の残余耐震性能判定方法の概念を示す。要求曲線(応答スペクトル)を計算するためには、減衰定数を仮定する必要がある。本装置では、弾性範囲で5%の減衰を仮定する(図中Curve 1)。図中(A)点で構造物が降伏すると、構造物の非線形により生じる履歴減衰を減衰として更に見込める。履歴減衰は構造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い履歴減衰も大きくなる。その為、要求曲線は(B)点より図中Curve 2のようにCurve 1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、本震での最大応答点と推定できる。

一方余震に関しても、本震より始まり余震終了までを非常に長時間の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。本震のみに比べて、余震も含めると入力エネルギーはその分増えるため、構造物の応答変位は本震のみと比べて増加する。従って、相対的に履歴減衰効果が低下したと考えることが出来る(図中Curve 3)。余震での最大応答点は、この要求曲線と性能曲線の交点となる。

本震に対する、構造物の損傷に応じた減衰定数の推定式は、文献3)や国土交通省告示1457号第6に規定されている。損傷に応じた履歴減衰の影響を考慮した要求曲線(図中Curve 2およびCurve 3)を得るためには、代表変位に応じて履歴減衰を含んだ減衰 h と、その時の周期 T を計算し、 h と T を用いて弾性応答計算を行う必要がある。その為、要求曲線と性能曲線の交点を求めるためには、多くの計算を要することとなる。そこで、国土交通省告示1457号第6には、 h に応じた要求曲線の、5%減衰での要求曲線に対する比率 F_h (以下、加速度低減率)が規定されている。この F_h を用いることにより、あらかじめ5%減衰での要求曲線を計算しておけば、異な

*1 独立行政法人 建築研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授 工学博士(正会員)

る減衰に対しても F_h を乗じるだけで計算できる。

しかし、本震から余震までの一連の入力に対する減衰定数の推定式およびその減衰定数に応じた要求曲線の低減率に関してはこれまでに検討された例がない。そこで本論文では、1質点系モデルを対象に、履歴モデルと入力地震動をパラメータとし、同一地震動を2回入力した解析を行うことにより、本震から余震までの入力に対する減衰定数の推定式および減衰定数に応じた要求曲線の低減率に関して検討を行う。

2. 本震に対する等価減衰と加速度低減率

調和定常応答では、構造物の非線形性によって生じる履歴減衰 h_{eq} は式(1)で計算できる。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

ここで、 ΔW は1サイクルの歪仕事量であり、 W は運動エネルギーの最大値である。例えば、バイリニアモデルでは、式(2)のように、図-2に示すような除荷剛性低減モデルでは式(3)のように計算できる³⁾。

$$h_{eq} = \frac{2}{\pi} (1 - 1/\mu) \quad (2)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} (1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (3)$$

実地震動下での応答では、履歴消費エネルギーが調和定常応答時に比べて小さくなるため、式(2)および式(3)では大きく見積もりすぎることとなる。これまでの非線形地震応答解析を用いた検討等^{4), 5)}から、文献3)では式(4)により推定することを提案している。また、国土交通省告示1457号第6では、「部材を構成する材料及び隣接する部材との接合部が緊結された部材」では式(4)、それ以外では式(5)により推定としている。

$$h_{eq} = 0.25 \cdot (1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (4)$$

$$h_{eq} = 0.20 \cdot (1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (5)$$

また、減衰定数に応じた要求曲線の低減率 F_h

は、同じく国土交通省告示1457号第6では式(6)のように定義されている。ここで、 h は構造物の等価粘性減衰定数であり、弾性時の粘性減衰定数を5%と仮定して、式(7)で計算している。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h} \quad (6)$$

$$h = h_{eq} + 0.05 \quad (7)$$

3. 余震に対する等価減衰と加速度低減率

3.1 検討手順と解析パラメータ

検討手順を以下に示す。なお、解析では弾性時の粘性減衰定数を5%と仮定し、瞬間剛性比例型モデルを用いた。

- (a) 各モデルに対して、所定の塑性率を生じさせるように入力地震動レベル L_1 を収束計算

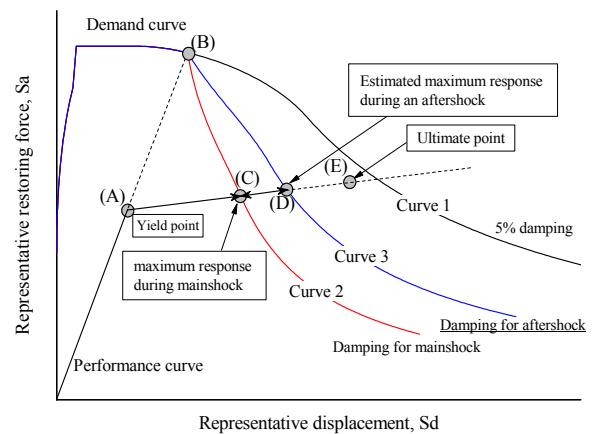


図-1 性能曲線と要求曲線

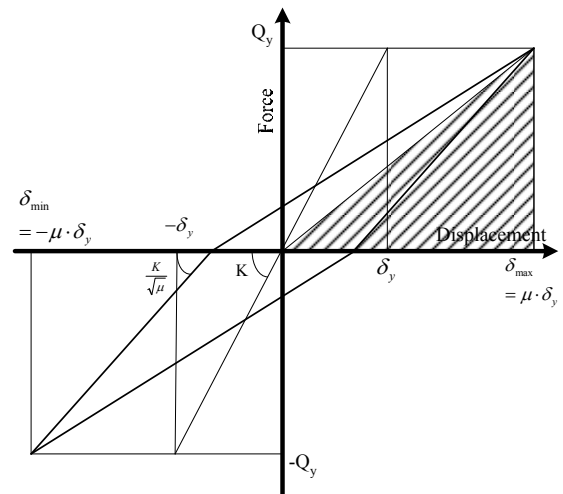


図-2 除荷剛性低減モデル

により求める。この時の最大代表復元力は A_{\max} である。

- (b) 最大応答点から等価周期 $T_{\text{Target},\mu}$ を計算し、5%減衰での $T_{\text{Target},\mu}$ での弾性解析を実施する。この時の最大代表復元力は $A_{5\%}$ である。 A_{\max} および $A_{5\%}$ から、 $F_{h1} = A_{\max} / A_{5\%}$ を計算する。更に、弾性解析時の最大代表復元力が A_{\max} と一致する減衰定数 h_{eq1} を収束計算により求める。
- (c) (a)の解析に引き続いて、20秒分の0入力で応答を収束させた後、レベル L_1 で再度地震動を入力する。この時の最大代表復元力は $A_{\text{Aftershock}}$ である。
- (d) 最大応答点から等価周期 $T_{\text{Aftershock}}$ を計算し、5%減衰での $T_{\text{Aftershock}}$ での弾性解析を実施する。この時の最大代表復元力は $A'_{5\%}$ である。 $A_{\text{Aftershock}}$ および $A'_{5\%}$ から、 $F_{h2} = A_{\max} / A'_{5\%}$ を計算する。更に、弾性解析時の最大代表復元力が $A_{\text{Aftershock}}$ と一致する減衰定数 h_{eq2} を収束計算により求める。

解析に用いた履歴モデルは、鉄骨造と木造を模擬した Bi-linear モデル、鉄筋コンクリート造を模擬した Takeda モデル、および履歴消費エネルギーの少ない構造を模擬した Takeda Slip モデルの3種類である。解析パラメータを以下に示す。降伏点剛性低下率 α_y は 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 の5ケース、第1折れ点での復元力 Q_c の第2折れ点での復元力 Q_y に対する比 $F_c R$ は 0.3, 0.5, 0.75 の3ケースとした。モデルの周期は 0.3 秒から 1.3 秒まで 0.1 秒刻みの 10 ケースとした。本震で生じる最大塑性率 μ_{\max} は、1, 2, 3, 4, 5 の5ケースとした。地震動は、El Centro、Taft、JMA Kobe、Hachinohe の EW および NS 成分と、第2種地盤を想定した人工地震波 10 波 (WG60~WG69) の計 18 波を用いた。解析ケース数は全体で、 $3 \times 5 \times 3 \times 10 \times 5 \times 18 = 40,500$ ケースである。

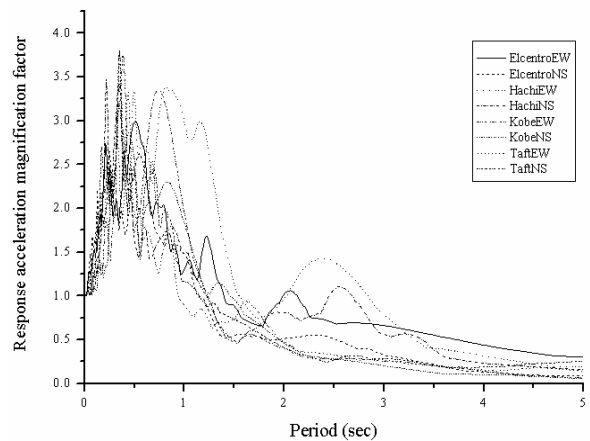
折れ点で生じる復元力の不釣り合い力、および折れ点での剛性変化により生じる減衰力の不釣り合い力は、合わせて外力として次ステップで解除した。解析時間刻みは 0.01 秒とした。等価周

期の算出法は、応答の正側および負側の最大点を結ぶ方法を用いた。

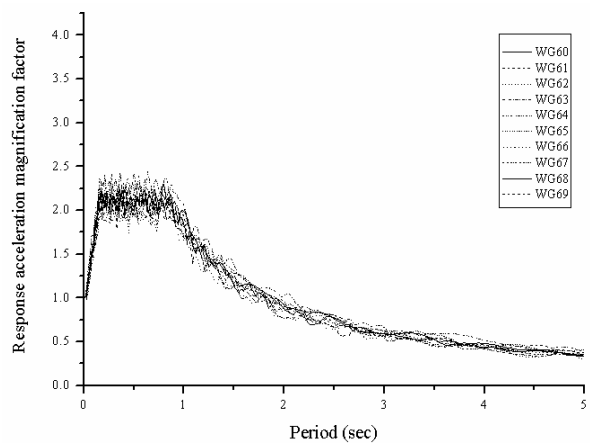
地震動の加速度応答倍率スペクトル図-3 に観測地震動と人工地震波に分けて示す。人工地震波は、ほぼ共通のスペクトル形状となっていることがわかる。

3.2 解析結果および結果の検討

本検討手法では、3.1 節で示したとおり、計 3 回の収束計算を行う。何れの場合も、目標値と計算値の差と目標値の比、すなわち式(8)を収束検討用の誤差 ε とした。また、許容誤差の値は、計算の発散を防ぐため、収束計算回数の関数としている。本検討では計算結果のうち、3 回の収束計算の ε が何れも 5% を下回る計 40,207 (全ケース 40,500) ケースを用いる。全ケースの 99.3% は何れの誤差も 5% を下回った事となる。



(a) 観測地震波



(b) 人工地震波

図-3 加速度応答倍率スペクトル

$$\varepsilon = \frac{|(\text{Target value}) - (\text{Calculated value})|}{|\text{Target value}|} \quad (8)$$

図-4 に一例として、Takeda モデルでの、本震に対する等価粘性減衰定数 h_{eq1} と最大塑性率、および本震と余震を一連として入力したときの等価粘性減衰定数 h_{eq2} と最大塑性率の関係を人工地震波と観測地震波別に示す。図中、■は本震に対する結果、●は本震と余震を一連として入力した場合の結果を示す。また、図中には式(4)および式(5)で計算される等価粘性減衰定数（内部粘性減衰定数として 5%を考慮）の他に式(9)および式(10)に示すように、係数をそれぞれ式(5)の 50%の 0.10、更にその 60%の 0.06 に低減し、内部粘性減衰定数として 5%を考慮した場合を併せて示している。

$$h_{eq} = 0.10 \cdot (1 - 1/\sqrt{\mu}) + 0.05 \quad (9)$$

$$h_{eq} = 0.06 \cdot (1 - 1/\sqrt{\mu}) + 0.05 \quad (10)$$

表-1 に各式の係数に対して、式による等価粘性減衰定数の計算値が解析結果を下回るケースの、全ケース数に対する比（以下、誤差率と呼ぶ）を示す。バイリニアールモデルの場合、係数 0.25（表中(1)欄）および 0.20（表中(2)欄）の場合ともに、観測地震動のほうが人工地震波よりも誤差率は小さいものの、19.5~52.7%が下回っている。余震に対しては、全体的に等価粘性減衰定数は本震に比べて小さくなるため、係数 0.25（表中(3)欄）および 0.20（表中(4)欄）の場合の

誤差率は更に大きくなる。係数を 0.10（表中(5)欄）および 0.06（表中(6)欄）に低減した場合、その誤差率は本震での係数 0.25 および 0.20 の場合に比べて小さくなり、11.4~27.1%である。

一方、Takeda モデルおよび Takeda Slip モデルでは、 h_{eq1} に関しては、バイリニアールモデルに比べて誤差率は小さく、係数 0.20（表中(2)欄）では両モデルでも誤差率は 20%以下であり、特に Takeda モデルの人工地震波を入力したケースでは、実に誤差率は 2.5%であった。

h_{eq2} に関しては、バイリニアールモデルの場合と同じく全体的に h_{eq1} を下回っていることが分かる。特に人工地震波を入力した場合では、係数 0.10（表中(5)欄）で誤差率は 1%を切っている。観測地震動を入力した場合では、係数 0.10 で誤差率は約 14%、係数 0.06 でも誤差率は約 10%あり、図-4(b)からも計算値を下回る解析結果の多くは、等価粘性減衰定数が 5%をも下回る場合が殆どである。つまり、これらのケースに対しては、係数の値を低減しても、安全性の改善はさほど見込めないことになる。以上の結果より、本震と余震を一連で入力した場合の等価粘性減衰定数は、安全側に残余耐震性能を評価することを考えると、式(9)で推定することが適当であると考えられる。

図-4 の中で、等価粘性減衰定数が内部粘性減衰定数（5%）を下回っているケースが幾つかある。これは、図-5 に示すように、性能曲線が 5%減衰での要求曲線との交点（図中(B)）で止まら

表-1 誤差率

Model	Motion	Total	Ratio							
			(1) 0.25 for h_{eq1}	(2) 0.20 for h_{eq1}	(3) 0.25 for h_{eq2}	(4) 0.20 for h_{eq2}	(5) 0.10 for h_{eq2}	(6) 0.06 for h_{eq2}	(7) F_{h1} w/ h_{eq1} (0.2)	(8) F_{h2} w/ h_{eq2} (0.1)
Bi-Linear	Artificial	5925	0.527	0.334	0.825	0.696	0.271	0.114	0.281	0.234
	EQ	4695	0.339	0.195	0.585	0.495	0.268	0.173	0.367	0.294
Takeda	Artificial	7493	0.123	0.025	0.390	0.156	0.009	0.005	0.022	0.002
	EQ	5973	0.188	0.128	0.433	0.269	0.131	0.094	0.257	0.182
Takeda Slip	Artificial	7458	0.432	0.156	0.742	0.494	0.005	0.003	0.112	0.002
	EQ	5963	0.281	0.183	0.656	0.436	0.137	0.095	0.314	0.227
Total	Artificial	20876	0.348	0.160	0.639	0.430	0.082	0.035	0.128	0.068
	EQ	16631	0.264	0.166	0.556	0.393	0.172	0.117	0.309	0.229
	All	37507	0.311	0.163	0.602	0.413	0.122	0.071	0.206	0.136

ずに図中(A) が最大応答となったため、等価周期での弾性最大応答が点(A)となるためには、点(C)を超えているため、減衰定数が5%を下回ったと考えられる。これは、等価周期が両方向の最大値から求めた周期とは厳密には異なることに起因する。特に観測地震動に対する結果で、5%を大きく下回る等価粘性減衰定数が得られているのは、観測地震動の要求曲線が大きくばらついており、相対的に図-5中の点(C)と点(A)が大きく異なることが多いためと考えられる。

本震および本震と余震を一連で入力した場合の、構造物モデルの応答加速度最大値 $A_{nonlinear}$ の、等価周期での5%減衰時の弾性解析による応答加速度最大値 A_{linear} に対する比 (F_{h1} および F_{h2}) と、等価粘性減衰定数の関係を検討する。表-1には、式(9)による計算値が解析結果を下回る場合の、全ケース数に対する比率（誤差率）を示している。ここで、 F_{h1} および F_{h2} が1を越えたケース、および Bi-linear モデルで目標塑性率が1のケースは除外した。

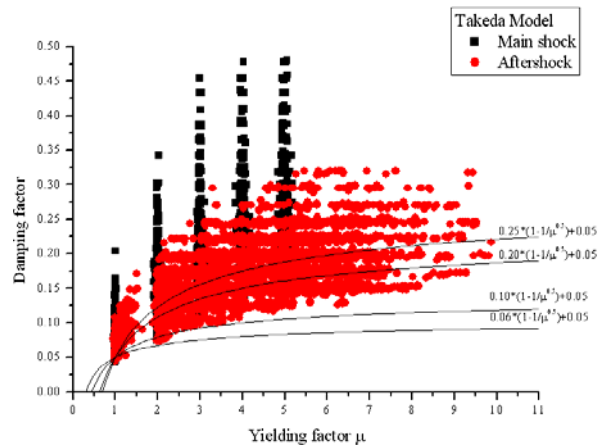
表-1中(7)欄および(8)欄に、等価粘性減衰定数として、推定式による値を用いた場合の結果を示す。図-6には一例として、Takeda モデルでの結果を示す。なお、ここで推定式による値とは、応答最大塑性率から本震に対しては式(5)に0.05を加えた値、余震に対しては式(9)により算出した値である。実際の判定では、この推定式による等価粘性減衰定数を用いて F_{h2} を求めることとなるので、これらの結果が、判定における精度を示している。

F_{h1} に関しては、表-1中(2)欄に示すように、式(5)が等価粘性減衰定数を解析結果の中央値よりも安全側に評価するため、同表(7)欄に示す結果の誤差率は小さい。その値は、Bi-linear モデルの観測地震動入力で一番大きく36.7%、Takeda モデルの人工地震波入力で一番小さく2.2%であり、全体でも20.6%の誤差率であった。

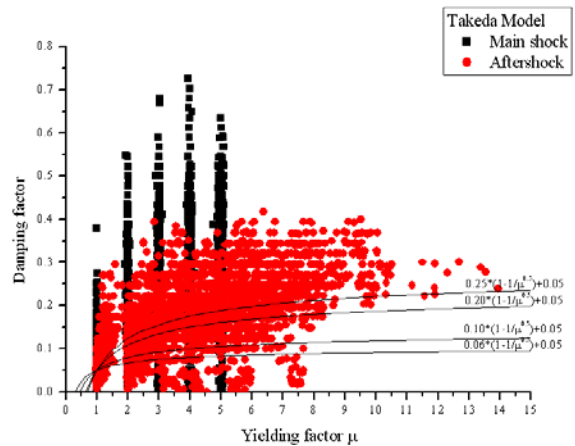
F_{h2} に関しては、表-1中(5)欄に示すように、式(9)が等価粘性減衰定数を解析結果よりも非常に安全側に評価するため、同表(8)欄に示す結果の

誤差率は小さい。その値は、Bi-linear モデルの観測地震動入力が一番大きく29.4%、Takeda モデルおよび Takeda-slip モデルの人工地震波入力が一番小さく0.2%であり、全体でも13.6%の誤差率であった。

以上のように、余震に対する F_{h2} は、式(9)によ



(a) 人工地震波



(b) 観測地震波

図-4 最大塑性率と減衰定数の関係 (Takeda モデル)

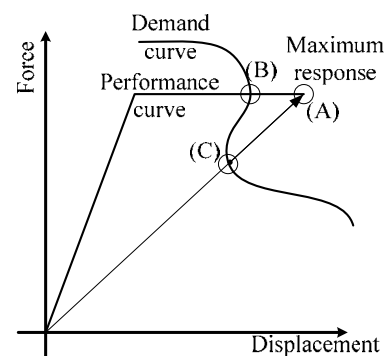


図-5 等価減衰が初期減衰を下回る場合

り推定した等価粘性減衰定数を用いて、式(6)により算出することにより、解析ケースの 86.4% に対しては安全側の評価となった。

5. まとめ

既存構造物の残余耐震性能判定手法を確立するため、1 質点系モデルを対象に、履歴モデルと入力地震動をパラメータとし、同一地震動を 2 回入力した解析を行うことにより、余震に対する減衰定数の推定式および減衰定数に応じた要求曲線の低減率に関して検討を行った。得られた知見を以下に示す。

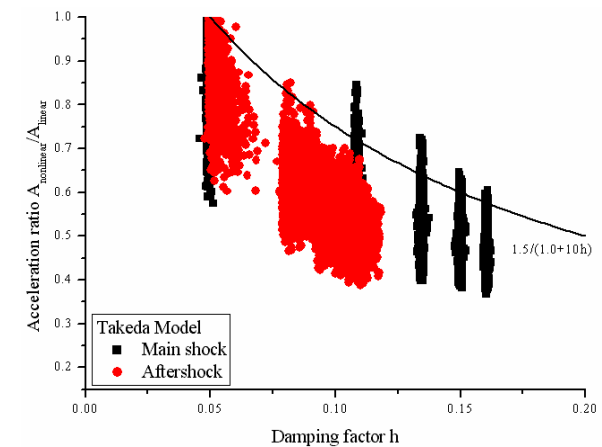
1. 以現行の本震に対する等価粘性減衰定数推定式 2 式 (式(4)、(5)) は、構造物のモデルや入力地震動の性質によって、3~53% 程度のケースが過大評価される精度で推定が可能であった。
2. 本震と余震を一連に入力した場合の等価粘性減衰定数は、式(9)を用いることにより本震に対する推定式よりも安全側に推定が可能であった。①と同様に Bi-linear モデルの場合は過大評価されるケースが約 27% であったが、Takeda モデルおよび Takeda-slip モデルの場合は、人工地震波入力で 1%、観測地震動でも約 14% であった。
3. 本震に対する F_h を計算する際の等価粘性減衰定数の値として、式(5)による推定式を用いた場合は、全体で 79.4% の解析結果を安全側に評価することが出来た。
4. 本震と余震を一連に入力した場合の F_h を計算する際の等価粘性減衰定数の値として、式(9)による推定式を用いた場合は、全体で 84.6% の解析結果を安全側に評価することが出来た。特に、Takeda モデルおよび Takeda-slip モデルを用いて人工地震波を入力した場合は、99.8% の解析結果を安全側に評価した。

参考文献

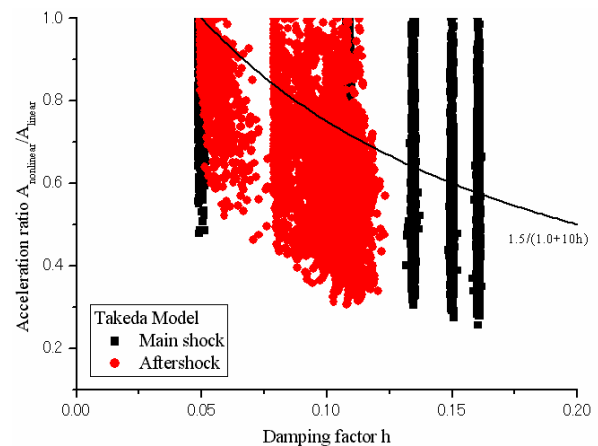
- 1) 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余

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，pp.119-126，2003.7

- 2) 鉄筋コンクリート造建築物の性能評価のための技術資料 第 1 編 RC 構造の応答値推定手法および限界値設定手法の例，建築研究振興協会，1998.3
- 3) 柴田明德，最新 耐震構造解析，森北出版株式会社，1991
- 4) Shibata, A. and M.A. Sozen, Substitute Structure Method for Seismic Design in R/C, Proc. ASCE, Vol. 102, No. ST1, 1976, 1
- 5) Shibata, A., Equivalent Linear Models to Determine Maximum Inelastic response of Nonlinear Structures for Earthquake Motions, 第 4 回日本地震工学シンポジウム，1975



(a) Artificial waves



(b) Earthquake records

図-6 加速度低下率と等価減衰定数の関係