

論文 制震補強された RC 建造物の応答特性とダンパーの必要耐力 算出法

八尋絹恵^{*1}・向井智久^{*2}・衣笠秀行^{*3}・野村設郎^{*4}

要旨：本研究は、既存 RC 建造物が履歴型ダンパーによって弾性範囲内に収まる場合を対象とし、制震補強された RC 建造物の応答特性を検討した。変位と加速度が同時に抑えられるダンパー耐力・剛性が地震波や躯体の条件によっては存在し得ること及び、躯体の周期との関係でダンパー補強により入力エネルギーが抑えられる場合があることを確認した。また、応答変形量を設計（損傷・安全）限界変形内に収めるために必要なダンパー耐力の算出法をエネルギーの釣合いに基づいて導出し、その精度はおおむね良好であった。

キーワード：既存鉄筋コンクリート建造物、制震補強、必要耐力、履歴型ダンパー

1. はじめに

近年、既存不適格建造物の補強法として、従来の「強度抵抗型補強」や「靱性抵抗型補強」に加えて、エネルギー吸収のための装置（ダンパー）を付加的に取り付け、耐震性能を向上させる方法、いわゆる「エネルギー吸収型補強」が用いられてきている。この補強法で耐震性能を向上させるには、応答変形が設計（損傷・安全）限界変形内に収まるようにダンパーを配置する必要がある。しかし、補強に必要なダンパー量については明確に規定されていないため、地震応答解析等によってダンパー量を個別に決定しているのが現状である。

既往の研究として、井上らは完全弾塑性型の履歴型ダンパーを有する鋼構造のフレームを対象として、大地震に対して柱・梁を塑性化させないために必要な設計用ベースシヤール係数やダンパーの必要変形能力について数値的・解析的に検討している¹⁾。一方 RC 建造物の制震補強に関しては小鹿、安達らによって研究されており、小鹿らは制震補強工法を施した RC 骨組の構造性能を静的水平加力実験により確認している²⁾。安

達らは制震補強された RC 建造物の補強効果を、地震応答解析を行わずに評価する方法として、耐震診断基準と同じ尺度の指標で評価する方法と等価線形化手法によりダンパーの性能を評価する2つの概算法を提案している³⁾。しかしこれらの研究では、地震時繰り返し回数が地震動特性によらず決定されており、理論的に算出された繰り返し回数を用いた耐力予測式は見当たらない。

本研究では、既存 RC 建造物（以下躯体）に履歴型ダンパーを取り付け（以下制震構造物）、それによって躯体が弾性範囲内に収まる場合を対象とし、制震構造物の応答特性を検討する（3章）。また、応答変形量を設計（損傷・安全）限界変形内に収めるために必要なダンパー耐力の算出法を地震入力の激しさを考慮したエネルギーの釣合いから導出し、その精度を検証する（4章）。

具体的には、1質点にモデル化した制震構造物の地震応答解析を行い、履歴型ダンパーにより躯体が弾性範囲内に収まる場合を選出し、ダンパーの耐力、剛性が躯体の応答（変位、加速度、エネルギー）におよぼす影響を検討する。ここ

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

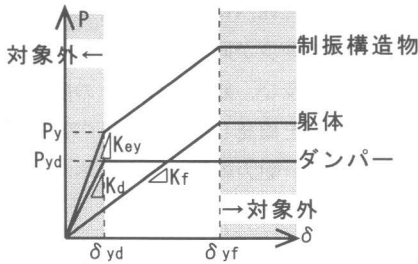
*2 東京理科大学助手 理工学部建築学科 工修 (正会員)

*3 東京理科大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

*4 東京理科大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

表-1. 入力地震波

地震波呼称	名称	観測年/観測地	成分	最大加速度 (gal)	最大速度 (kine)
Kobe NS	兵庫県南部	1995/神戸海洋気象台	NS	818	85.5
El-Centro NS	Inperial Valley	1940/El-Centro	NS	342	38.1
Taft EW	Kern Country	1952/Taft	EW	176	17.5



- P_{yd} : ダンパー降伏耐力
- P_y : ダンパー降伏時の制振構造物耐力
- δ_{yd} : ダンパー降伏変位
- δ_{yf} : 躯体降伏変位
- K_d : ダンパー初期剛性
- K_f : 躯体降伏時剛性
- K_{ey} : 制振構造物初期剛性

図-2 復元力モデル

で、応答変位，加速度が共に低減されるダンパ一の耐力，剛性についても検討を行う(3.2)。次に，地震動の威力をエネルギー入力量とエネルギー入力速度により評価し，躯体及びダンパ一のエネルギー吸収のモデル化を行い，エネルギーの釣合いから応答変形とダンパー耐力の関係を導出し(4.2)，その精度を検証する(4.3)。

2. 解析概要

2.1 構造物の復元力モデル

制震構造物はダンパーと躯体が並列に結合された1質点でモデル化する(図-1)。復元力モデルは図-2のように表される。躯体は通常 Tri-linearであるがここでは簡便に Bi-linear型とし，履歴型ダンパーは完全弾塑性の復元力特性を有するものと仮定する。なお本研究では，躯体がダン

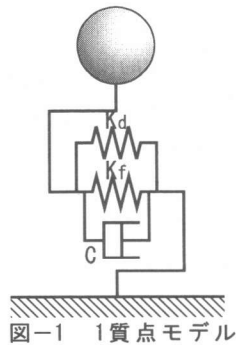


図-1 1質点モデル

表-2 解析パラメータ

躯体	
降伏時周期	$T_f=0.5, 1.0, 1.5$ (s)
降伏耐力	無補強時の最大塑性率が 3,6 となるように設定 (表-3 参照)
重量	$W=10$ (kN)
減衰	$h=0,5$ (%)
ダンパー	
剛性比	$\gamma=0.83, 1.11, 1.67, 3.33$
耐力比	$\beta=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$

表-3 躯体降伏耐力 (kN)

地震波	降伏時周期 (s)	塑性率3		塑性率6	
		h=0%	h=5%	h=0%	h=5%
Kobe NS	0.5	8.5	7.94	7.3	6.52
	1.0	5.0	3.9	1.75	1.57
	1.5	2.1	1.84	1.0	0.82
El-Centro NS	0.5	4.3	3.6	2.4	2.02
	1.0	1.5	1.34	0.91	0.83
	1.5	0.9	0.79	0.47	0.44
Taft EW	0.5	1.5	1.27	1.08	0.92
	1.0	0.76	0.63	0.45	0.42
	1.5	0.39	0.36	0.24	0.23

パー補強によって弾性範囲内に収まり，かつダンパーが降伏する場合を対象としている。よって，図-2中の影付部分は検討対象外とする。

2.2 解析パラメータ

入力地震波は表-1に示す3波を原波で使用する。躯体およびダンパーの解析パラメータを表-2に示す。本研究は補強の必要な躯体を想定しているため，躯体の降伏耐力を無補強時の塑性率が3，6となるよう各地震波，減衰ごとに設定した。各躯体の降伏耐力を表-3に示す。またダンパーの解析パラメータについて，「剛性比 γ = ダンパー初期剛性 K_d /躯体の降伏時剛性 K_f 」，「耐力比 β = ダンパー降伏耐力 P_{yd} /躯体の降伏耐力 P_y 」と定義する。ダンパーの剛性は，最大で躯体の初期剛性となるように剛性比を設定し，ダンパーに直列配置したブレースを考慮した値としている。解析は，Runge Kutta法の4次精度公式を用いて行う。躯体の減衰は瞬間剛性比例型とし，減衰定数は0，5%とする。

表-4 検討対象となる解析ケース数

降伏時 周期	減衰 定数	Kobe		El-Centro		Taft	
		NS	NS	NS	EW		
塑性率		3	6	3	6	3	6
0.5 (s)	0%	5/24	5/24	13/24	3/24	4/24	0/24
	5%	10/24	4/24	13/24	2/24	3/24	0/24
1.0 (s)	0%	1/24	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24
	5%	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24
1.5 (s)	0%	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24
	5%	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24	0/24

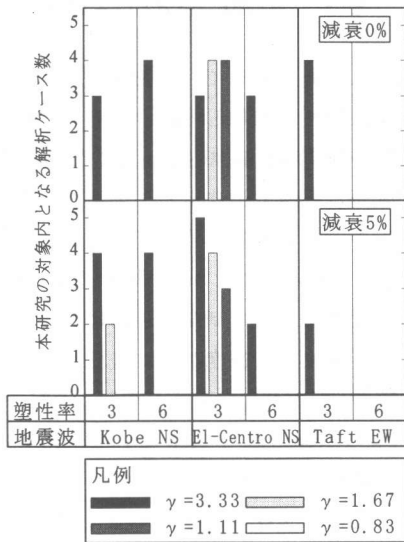


図-3 検討対象となる解析ケース数 (Tf=0.5)

3. 制震構造物の応答特性

3.1 検討対象となる制震構造物

本研究で対象となる解析ケース数を、地震波・躯体の降伏時周期・減衰定数・無補強時の塑性率ごとに集計したものを表-4に示す。表中の分母は全解析ケース数、分子は対象内となる解析ケース数である。降伏時周期が1.0, 1.5秒の場合はほぼ全てのケースで補強された躯体が塑性化し、検討対象外となった。よって、本研究でダンパー補強された長周期の躯体を弾性内に収めるのは難しいといえる。図-3は、表-4中から躯体の降伏時周期が0.5秒のものに着目し、縦軸に本研究で対象となる解析ケース数、横軸に地震波および無補強時の最大塑性率を示している。El-Centro NS, $\mu=3$ のように、ダンパーが良く効いている場合もあるが、Taft EWでは $\mu=3$ で剛性比が大

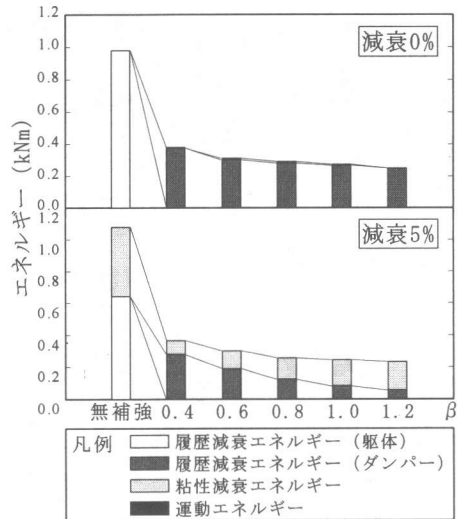


図-4 耐力比とエネルギーの関係 (El-Centro NS, Tf=0.5(s), $\mu=3$, $\gamma=3.33$)

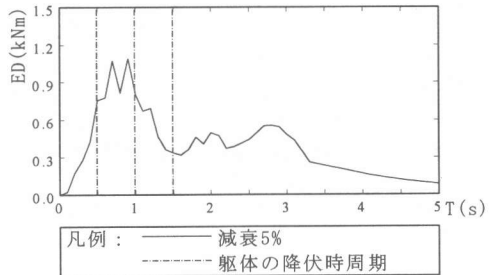


図-5 全入力エネルギースペクトル (El-Centro NS)

きい場合しか弾性に収まらず補強効果が小さかった。各地震波・塑性率別にみると、剛性比 γ が大きいくほど躯体が弾性内に収まる個数が増加している。これは剛性比が大きいくほど降伏変位が小さいため早く塑性化し、ダンパーの履歴吸収エネルギーが大きくなるためである。図-4はEl-Centro NS, 躯体の降伏時周期Tf=0.5(s)においてダンパー耐力比によるエネルギーの推移を表しており、縦軸にエネルギー、横軸にダンパーの耐力比 β を示しているが、躯体にダンパーが取り付くことによって入力エネルギーが減少している。図-5は、El-Centro NSの全入力エネルギースペクトルである。補強により躯体の剛性は増加し周期は短くなるが、図-5よりTf=0.5(s)の場合は周期が短くなることにより入力エネルギーが減少し、Tf=1.0(s)およびTf=1.5(s)の場合

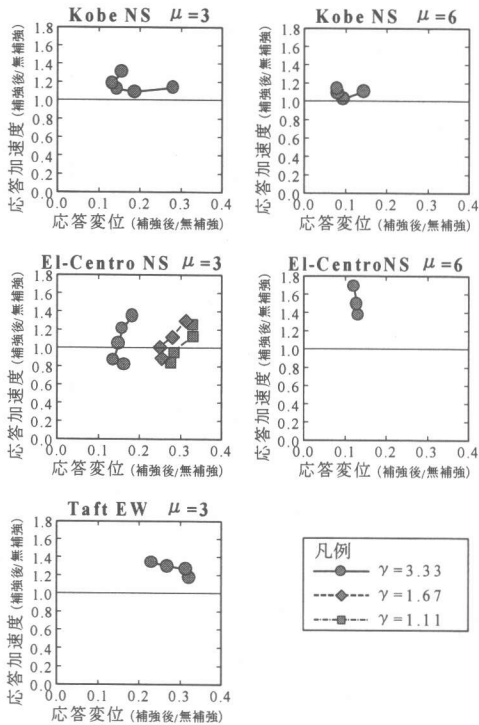


図-6 応答変位・加速度の傾向 (h=0%)

は周期が短くなると入力エネルギーが増加している。Tf=0.5(s)でダンパーの剛性が大きい場合に補強効果が大きいのは剛性の増大により入力エネルギーが減少するためであると思われる。

以上よりダンパー補強により躯体が弾性範囲内に収まるのは、躯体の降伏時周期が0.5秒程度、無補強時の塑性率が3程度で、ダンパー剛性比が大きい場合である。またダンパー補強の効果は地震波特性に依存するといえる。

3. 2 応答特性の検討

制震構造物の利点として、建物に剛性と減衰を付加することで応答変位、加速度を同時に制御し得ることが文献⁴⁾で述べられている。図-6は減衰定数が0%における応答変位、加速度の傾向を表している。横軸に応答変位、縦軸に応答加速度をとり、共に無補強時の応答で基準化している。減衰定数が5%の応答は0%の場合とほぼ同様であるため省略する。本研究で想定した制震構造物では、El-Centro NS, μ=3の一部を除いて応答加速度は補強後の値が大きくなって

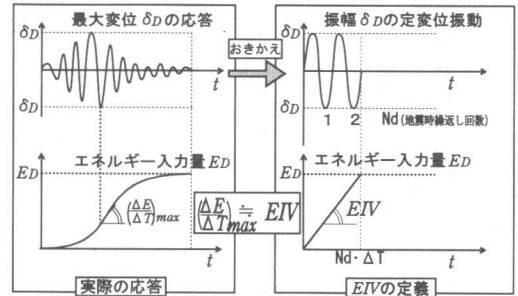


図-7 $\Delta E_{max}/\Delta T$ とEIVとの関係

いる。この原因として、補強後はダンパーの付加により剛性が増加しており、それに伴い制震構造物の周期が無補強時より短くなること及び、無補強時は躯体が塑性化して加速度が抑えられているが、補強後は躯体が弾性になるため加速度が抑えられないことが挙げられる。

本研究で想定した制震構造物において、補強後の応答変位と加速度が共に低減されるダンパーの剛性、耐力が存在するか否かの検討を行う。図-6より Kobe NS, μ=3,6や El-Centro NS, μ=3は応答変位、加速度が共に低減されている点があるが、Taft EW, μ=3のように応答変位、加速度が同時に抑えられている点が見当たらない場合もある。よって変位と加速度を共に低減するダンパーの剛性、耐力の有無は地震波、躯体の条件に依存するといえる。

4. 必要耐力算出式の提案⁵⁾

3章から、補強後の応答変位と加速度が共に低減できないことが確認されている。そこで、応答変形量がある一定の大きさ以下に収まるようにダンパーを配置する必要があるため、本章では応答変形量を設計(損傷・安全)限界変形内に収めるために必要なダンパー耐力の算出法を導出する。

4. 1 実エネルギー入力速度 $\Delta E_{max}/\Delta T$ とエネルギー入力速度 EIV

EIVは、図-7のように実際の応答を、 δ_D を振幅とした定変位振幅のエネルギー吸収を行うモデルに置換した場合、エネルギー入力量EDと繰り返し回数Nd及び ΔT に等価周期Teを用いて式(1)で定義され、式(1)について「 $\Delta E_{max}/\Delta T = EIV$ 」

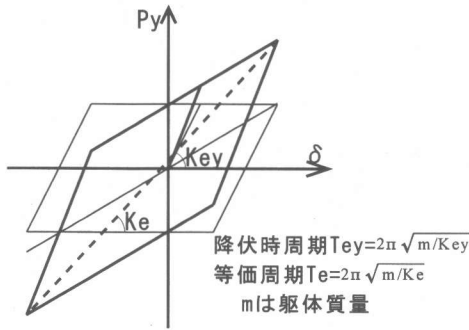


図-8 降伏時周期と等価周期の定義

を仮定してNdについて解くと式(2)が得られる。

$$EIV = \frac{ED}{Nd \cdot \Delta T} = \frac{ED}{Nd \cdot Te} \quad (1)$$

$$Nd = \frac{ED}{\Delta E_{max}} \quad (2)$$

等価周期 Te とは、図-8のように正負それぞれの最大応答変位から求めたものであり、 ΔE_{max} は1周期 Te あたりに入力するエネルギー量の最大値である。エネルギー吸収量 ES を、実際の応答を定変位振幅するモデルに置換した制震構造物の吸収可能なエネルギー量とすると、地震時繰り返し回数 Nd はこの制震構造物が、地震入力エネルギー ED を消費する($ES=ED$)ために必要な繰り返し回数として定義され、 Nd は構造物が地震時に受ける繰り返し回数の多少を表す指標としての意味を持つ。

4.2 エネルギー吸収のモデル化と必要耐力式

δ_D の定変位振幅を有する制震構造物を想定する。そのエネルギー吸収 ES を図-9のようにモデル化し、式(3)に示す。

$$ES = E_{yf} + E_{hf} + E_{yd} + E_{Cd} \quad (3)$$

$$E_{yf} = 0.5 \times K_f \times \delta_{max}^2$$

: フレームの弾性吸収エネルギー

$$E_{hf} = 2\pi h \times K_f \times \delta_{max}^2 \times Nd$$

: フレームの粘性減衰エネルギー

$$E_{yd} = 0.5 \times K_d \times \delta_{yd}^2$$

: ダンパーの弾性吸収エネルギー

$$E_{Cd} = 4 \times P_{yd} \times (\delta_{max} - \delta_{yd}) \times Nd$$

: ダンパーの履歴吸収エネルギー

$ES=ED$ として式(3)を P_{yd} について解くと、式(4)

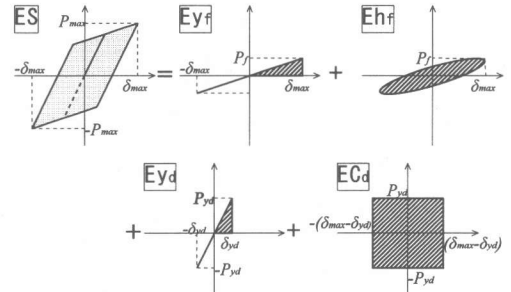


図-9 エネルギー吸収のモデル化

が得られる。

$$P_{yd} = \frac{Y}{1+Y} \sqrt{\frac{2ED \cdot K_{ey}}{\alpha \mu_a^2 + 1 - \alpha + 8Nd(1-\alpha)(\mu_a+1) + 4\pi \cdot h \cdot \alpha \cdot \mu_a^2 \cdot Nd}} \quad (4)$$

$\gamma = K_d/K_f$: ダンパー剛性比, $\alpha = K_f/K_{ey}$

μ_a : ダンパー平均塑性率

(ダンパーの正負最大塑性率の平均値)

Nd : 繰り返し回数

これにより実際の応答を定変位振幅するモデルに置き換えることにより、弾塑性応答時の必要耐力算出式を導いた。 P_{yd} はダンパーの平均塑性率を保証するに必要な耐力を表している。 P_{yd} を算出するには、エネルギー入力量 ED および繰り返し回数 Nd の値の決定が必要である。これらの値を推定するという手段もあるが、本研究では耐力算出式に至るモデル化の正否を検討することを目的とするため、 ED 及び Nd は応答値を用いることとした。

4.3 精度検証

図-10はEl-Centro NS, Kobe NSにおいて、横軸にダンパーの最大塑性率 μ_{max} 、縦軸にダンパーの降伏震度(P_{yd}/mg)を示す。推定値は応答値をよく追っており、本研究のモデル化は正しいといえる。しかし推定値が応答値をやや下回っている場合もあるため、設計時には P_{yd} を割り増す必要が考えられる。なお、Taft EWにおいても同様の結果が得られた。

4.4 累積塑性変形倍率

ダンパーの性能を評価する指標として累積塑性変形倍率を用いることは有効である。そこで、実際の応答を、定変位振幅のエネルギー吸収を行うモデルに置換した場合の繰り返し回数 Nd と

ダンパーの平均塑性率 μ_d を用いてダンパーの累積塑性変形倍率 η を式(5)により推定する。

$$\eta = 4 \times (\mu_d - 1) \times Nd \quad (5)$$

図-11に式(5)の精度検証を示す。縦軸に式(5)による推定値、横軸に応答値を示す。両者はほぼ等しく、推定式は有効であるといえる。

5. まとめ

本研究は、既存RC構造物に履歴型ダンパーを取り付けた場合の応答特性を把握し、応答を設計(損傷・安全)限界変形内に収めるために必要なダンパー耐力の算出法を提案した。本研究で想定する躯体については以下の結論を得た。

- ①変位と加速度を共に低減するダンパーの剛性、耐力の有無は地震波、躯体の条件に依存する。
- ②躯体の周期が 0.5 秒程度の場合、ダンパー補強により入力エネルギーを抑え得る。
- ③エネルギーの釣合いから応答変形とダンパー耐力の関係式を導出し、その精度はおおむね良好であった。

今後の課題として、躯体の降伏を認めた制震構造物の応答特性の検討および、多質点における各層の剛性・耐力に応じたダンパーの配置に関する検討の必要がある。

参考文献

- 1) 井上一朗ほか：履歴型ダンパーを用いた架構の地震応答と設計耐力，鋼構造論文集，第3巻，第11号，pp65-77，1996.9
- 2) 小鹿紀英ほか：弾塑性ダンパを用いた既存RC建物の制震補強に関する研究(その1-その4)，日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp895-902，1997.9
- 3) 安達洋ほか：摩擦ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強設計に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp391-396，1999
- 4) 笠井和彦：シンポジウム主旨および制振性能に関する私見，パッシブ制振構造シンポジウム 2000，pp61-76，2000.3
- 5) 向井智久，衣笠秀行，野村設郎：地震動を受けるRC構造物の限界応答変形量を保証するに必要な耐力

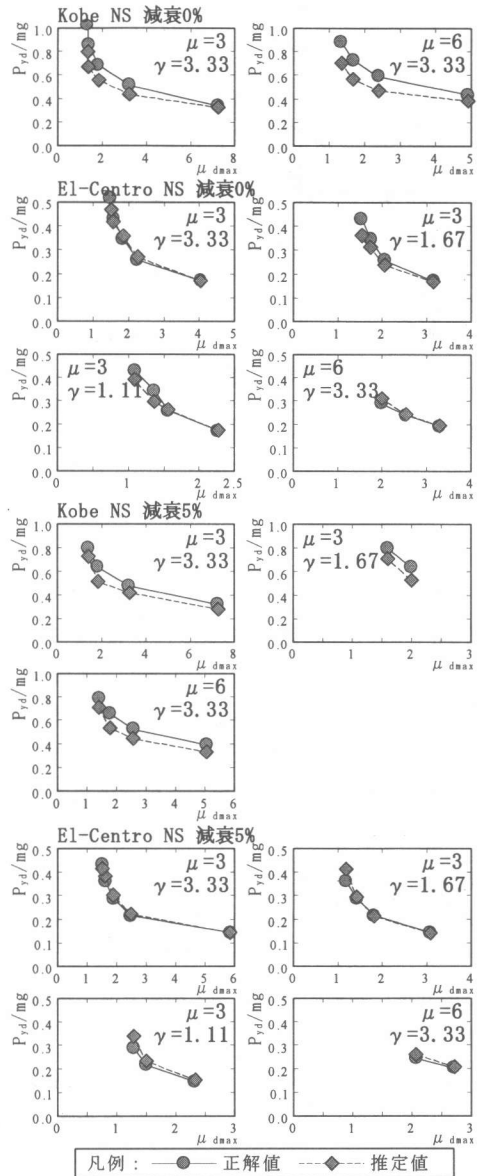


図-10 精度検証

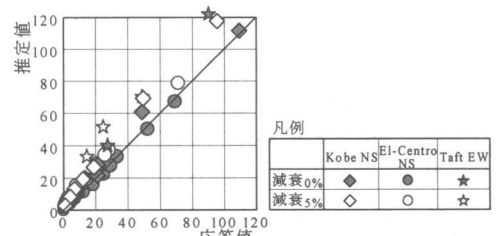


図-11 精度検証
(累積塑性変形倍率)

算出法とその精度検証，日本建築学会構造系論文集，第532号，pp137-143，2000.6