

論文 エネルギー入力特性に基づいたRC構造物の応答変形予測手法とその精度検証

太田 健吾^{*1} 向井 智久^{*2} 衣笠 秀行^{*3} 野村 設郎^{*4}

要旨：既往の研究により提案されている地震入力の激しさを表すエネルギー入力速度に基づいたエネルギーの釣合手法において、粘性減衰吸収エネルギー E_h に応答値を用いた場合、塑性率が小さい範囲で弾性歪み吸収エネルギーを過大に評価する傾向があり、それによって必要耐力算出式の推定精度が下がる結果が得られた。また、粘性減衰吸収エネルギーに関して、既往の研究では最大変位に依存するとして簡易的に与えていたが、速度依存型の項として扱う事を検討した。その結果、最大応答速度と塑性率との関係を考慮して粘性減衰吸収エネルギーを評価する必要がある事を確認した。
 キーワード：弾性歪み吸収エネルギー，粘性減衰吸収エネルギー，速度依存性

1. はじめに

構造物の耐震性を性能により評価する方法として、筆者らは文献1)において、1質点系にモデル化された鉄筋コンクリート構造物を対象として、実エネルギー入力速度 E_{max}/T とエネルギー入力速度EIVが等しいという仮定のもと、応答変形量を保証するために必要な耐力の算出方法の提案を行い、手法の有効性を確認している。^(2章で後述)しかし、粘性減衰吸収エネルギー E_h の項に関しては簡略的に最大変位に依存するものとして算出しているが、本来、粘性減衰は速度に依存する点を考えるとさらに検討する必要がある。

以上より、本論は手法の特性を詳細に検討するために、粘性減衰吸収エネルギーに応答値を用いて、必要耐力を算出した場合の躯体の履歴吸収エネルギーのモデル化の妥当性を確認する。また、粘性減衰吸収エネルギー E_h の項において、 E_h を速度に依存する減衰力のなした仕事として考えた場合の手法とその精度検証を行う。

2. 必要耐力算出方法

図-1においてエネルギー入力速度EIVと地震時繰り返し回数NDについて示す。

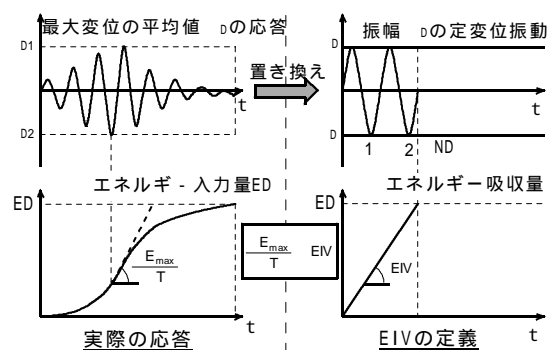


図-1 E_{max}/T とEIVの定義

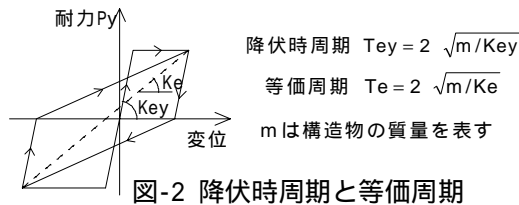
図-1の左側の図は最大応答変位が D となるときの時刻歴応答変位と構造物に入力されるエネルギーを各々示している。これを同図右側に示すように D を振幅とした定変位振幅振動に置き換える。EIVはこの定変位振幅振動時のエネルギー入力の激しさとして定義される。地震時繰り返し回数NDはこのように置換した構造物が地震入力エネルギーEDを消費する為に必要な振動の回数として定義され

*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 理工学部建築学科 助手 工修 (正会員)
 *3 東京理科大学 理工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)
 *4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

る。そこで、式(1)においてEIVを定式化する。

$$EIV = \frac{ED}{ND \cdot T} = \frac{ED}{ND \cdot T_e} \quad (1)$$

ここで、EDはエネルギー入力量であり、Tは図-2で示される等価周期 T_e を用いる。



式(1)と「 $E_{max}/T = EIV$ 」の関係から、地震時繰り返し回数 ND について解くと式(2)が得られる。

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

ここで、 E_{max} は1周期 T_e あたりに入力されるエネルギー量の最大値を示す。

次に、 D を振幅として定常振動する構造物におけるエネルギー吸収ESのモデル化を図-3に示す。

$$ES = E_y + E_{ds} + E_c + E_h \quad (3)$$

$$E_y = 0.5P_y y \quad E_{ds} = 2P_y (D - y) \\ E_c = 4P_y (ND - 1)(D - y) \quad E_h = 2 h_0 P_y D ND$$

E_y : 弾性歪みエネルギー

E_{ds} : 1サイクル目に吸収される塑性歪みエネルギー

E_c : 2サイクル目以降の累積塑性歪みエネルギー

E_h : 粘性減衰吸収エネルギー

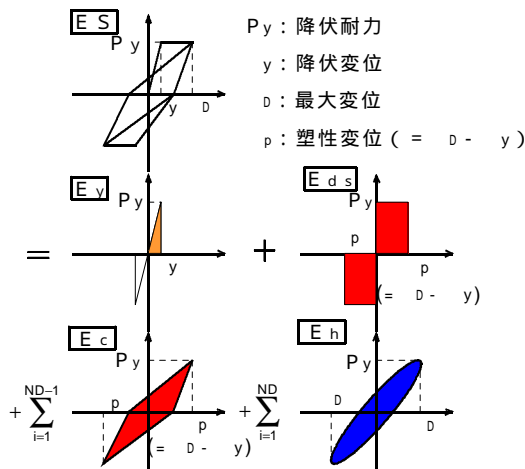


図-3 構造物のエネルギー吸収のモデル化

ここで、 P_y は降伏耐力、 h_0 は初期減衰定数

であり、 μ はループ面積係数で図-4で示すように定義する。 μ は正負の最大塑性率の平均値である平均塑性率を表し、 Key は図-2に示す降伏時剛性を表している。

$$E_i = 2 \left(D - \frac{P_y \sqrt{\mu}}{Key} \right) P_y \\ = \frac{E_i}{4P_y p} = \frac{D - y \sqrt{\mu}}{2 p}$$

図-4 ループ面積係数 の定義

$ED = ES$ として式(3)を耐力 P_y について解くと式(4)が得られる。

$$P_y = \sqrt{\frac{ED \cdot Key}{0.5 + 2(\mu - 1) + 4(ND - 1)(\mu - 1) + 2 h_0 \mu ND}} \quad (4)$$

式(4)を用いて平均塑性率 μ を保証するに必要な耐力 P_y を算出できる。

3. 既往式の精度検証と弾性歪み吸収エネルギー E_y の検討

構造物のエネルギー吸収を図-3のようにモデル化して得られた必要耐力算出式である式(4)の精度検証を行い、モデル化に関する妥当性を確認する。

3.1 解析パラメータ

地震応答解析のパラメータを表-1に示す。復元力特性はDegrading-bilinear型とし、除荷時剛性は $Key/\sqrt{\mu}$ (Key :降伏時剛性)を用いる。地震波は全て50kineに基準化しており、減衰の種類は瞬間剛性比例型とした。全解析数は378ケースである。

表-1 解析パラメータ

重量 m_g (kN)	10
降伏時周期 T_{ey} (s)	0.5, 1.0, 1.5
減衰定数 h (%)	3, 5, 7
塑性率 μ	1.1 ~ 2.0 (0.1刻み) 2.0 ~ 6.0 (1.0刻み)
使用地震波	ELCENTRO NS KOBEN NS TAFT EW

3.2 精度検証結果

図-5に $h=5\%$ 、 T_{ey} が0.5, 1.0, 1.5秒におけるELCENTROの地震波に対する解析結果を示す。

図-5から式(4)により算出した耐力は、応答

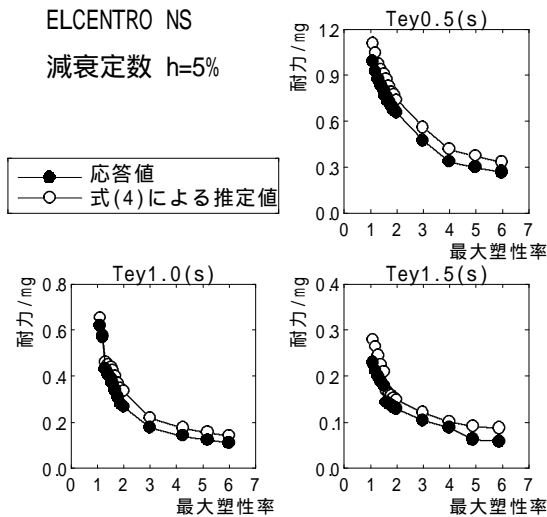


図-5 式(4)により算出した推定値と応答値の比較

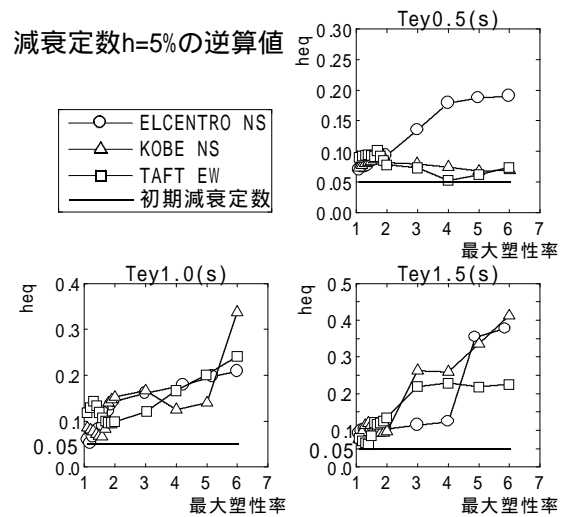


図-6 heq と最大塑性率の関係

値に対してやや大きい値であるが非常に高い精度を有している。

なお、 $h=3\%$ 、 7% のELCENTROに対する結果と、他のKOBE、TAFTに対する結果も同様の傾向を示している。よって、建物全体のエネルギー吸収のモデル化は、おおよそ妥当であることになる。

3.3 式(4)における減衰定数について

図-3に示したように構造物のエネルギー吸収のモデル化を行い、得られた必要耐力算出式(4)における減衰定数 h に関して以下で検討する。

耐力 P_y として地震応答解析の結果、求まる応答値を用いて逆算した減衰定数 h_{eq} を式(5)により算出する。

$$h_{eq} = \frac{ED \cdot Key - P_y^2 \{0.5 + 2(\mu - 1) + 4(ND - 1)(\mu - 1)\}}{2 \cdot \mu \cdot ND \cdot P_y^2} \quad (5)$$

h_{eq} の推移を地震波種別毎に図-6に示す。初期減衰定数 h_0 は0.05であるが、逆算による減衰定数 h_{eq} は h_0 と比べ大きく、最大塑性率が増加するにつれ、その傾向は顕著である。従って、実際に比べて粘性減衰吸収エネルギー E_h は少なく見積もられていることから、図-5で応答値に比べ、やや大きい値を推定していることになる。

3.4 E_y, E_d, E_c のモデル化の精度検証

構造物のエネルギー吸収のモデル化をより詳細に検討する為に、式(3)における E_h 以外の項目である E_y, E_d, E_c のモデル化の妥当性を検討する。

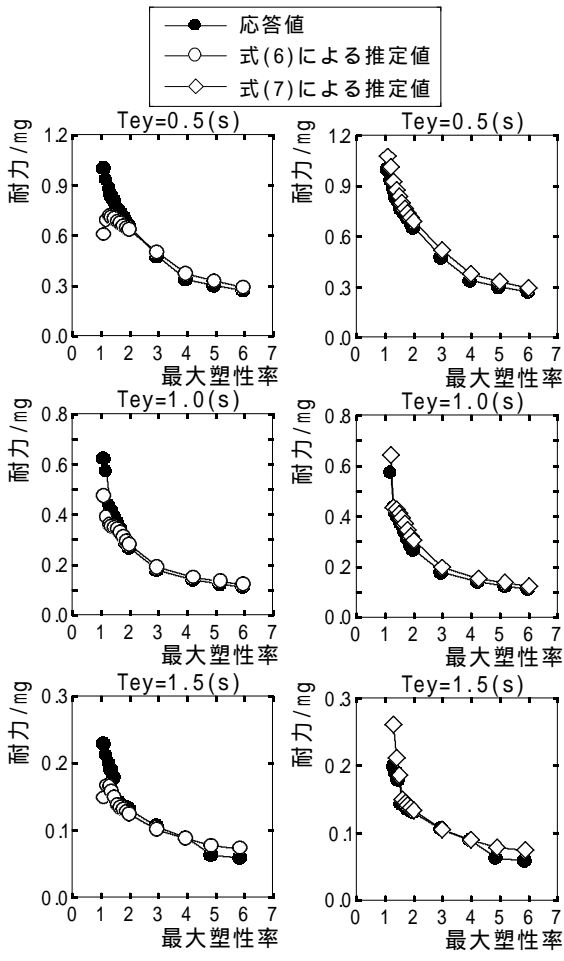
ここでは、 E_h に地震応答解析を行い求めた粘性減衰吸収エネルギーTVEを用いて、エネルギー吸収を E_y, E_d, E_c でモデル化した場合と E_d と E_c でモデル化した場合の精度比較を行う。TVEを用いて必要耐力算出式を求めると E_y を含める場合と含めない場合で、式(6)、(7)で各々耐力が与えられる。

$$P_y = \sqrt{\frac{(ED - TVE) \cdot Key}{0.5 + 2(\mu - 1) + 4(ND - 1)(\mu - 1)}} \quad (6)$$

$$P_y = \sqrt{\frac{(ED - TVE) \cdot Key}{2(\mu - 1) + 4(ND - 1)(\mu - 1)}} \quad (7)$$

図-7に $h=5\%$ 、 Tey が0.5、1.0、1.5秒におけるELCENTROの地震波に対する耐力算出式の精度を示す。左図は式(6)により算出した必要耐力と応答値との比較を行い、右図は式(7)により算出した必要耐力と、応答値との比較を行っている。

図-7より、弾性歪み吸収エネルギーを含めて耐力算出を行った場合、最大塑性率が1に近い範囲において応答値よりも小さい値として算出する傾向がある。その原因として次の事が考えられる。



ELCENTRO NS h=5% ELCENTRO NS h=5%

図-7 Eyの有無によるPyの精度比較

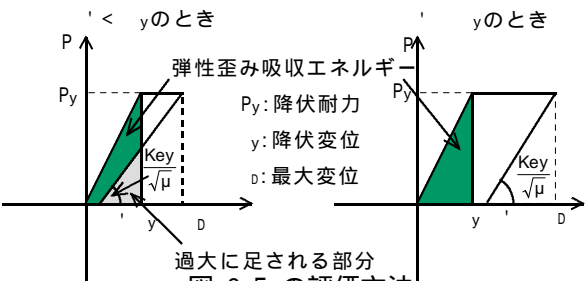


図-8 Eyの評価方法

図-8の 示すように $y > y'$ ならば、弾性歪み吸収エネルギー E_y の部分をエネルギー吸収しているが、 $y < y'$ ならば弾性歪み吸収エネルギー E_y を過大に評価する事になる。その結果、図-7の左図に示すように式(6)により求めた必要耐力が小さい値として算出されていると考えられる。また、 E_y を含めずに式(7)により求めた必要耐力は高い精度を示しているが、最大塑性率が1に近い範囲では応答値より大きく算出される傾向がある。よって、粘性減衰吸収エネルギーに応答値を用いて最大塑性率の小さい範囲で

必要耐力を算出する場合、安全側を考えて、 E_y をエネルギー吸収項としてモデル化する必要はないものと考えられる。

4. 粘性減衰吸収エネルギー E_h の検討

構造物のエネルギー吸収を式(3)のようにモデル化する際に粘性減衰吸収エネルギー E_h を式(8)により算出している。

$$E_h = 2 h_0 P_y D \quad (8)$$

本章では、振動方程式から求めた地震時における減衰力のなした仕事 D を考える。²⁾

振動方程式の両辺に $dy = \dot{y} dt$ をかけて地震継続時間で積分すると以下の式(9)のようにエネルギーに関する釣合式が導かれる。

$$\frac{1}{2} m \dot{y}^2 + \frac{1}{2} k y^2 + \int_0^t c \dot{y}^2 dt = \int_0^t (-m \ddot{y}_0^2) \dot{y} dt \quad (9)$$

式(9)における減衰力のなした仕事 D を以下に示す。

$$D = \int_0^t c \dot{y}^2 dt \quad (10)$$

ここで、 m : 質量、 k : 構造物の剛性、

c : 粘性減衰係数、 \ddot{y}_0 : 地動加速度

以下で式(10)中の c と \dot{y} の各項について検討を行う。

(a) 粘性減衰係数 c について

式(10)の中で粘性減衰係数 c の値に関して以下の c_e を考える。

$$c = 2h_0 m_e \quad c_e = 2h_e m_e$$

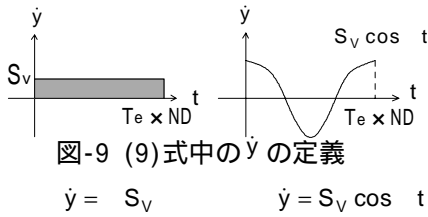
ここで、 h_0 : 初期減衰定数、 e : 等価円振動数、 h_e は等価減衰定数で式(11)、式(12)により算出した。

$$e = \sqrt{\frac{K_e}{m}} \quad (11) \quad h_e = 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) + h_0 \quad (12)$$

K_e は等価剛性(図-2参照)、 μ は平均塑性率を表している。なお、円振動数 e に式(11)を用いる事により、粘性減衰係数項において塑性化に伴う粘性減衰吸収エネルギーの減少を考慮している。

(b) 速度項 \dot{y} について

式(10)の中で速度項に関して図-9で示すように考え、以下の \dot{y} を考える。



S_v は各減衰の速度スペクトルから与え、積分時間 t を $T_e \times ND$ で与える事により、地震時繰り返し回数 ND を考慮している。

のように \dot{y} を考えると式(10)における $\int_0^t \dot{y}^2 dt$ の項に関しては以下で表せる。

$$\int_0^t \dot{y}^2 dt = S_v^2 T_e ND \quad (13)$$

$$\int_0^t \dot{y}^2 dt = \frac{S_v^2 T_e ND}{2} \quad (14)$$

粘性減衰吸収エネルギーを式(10)のように考え、構造物のエネルギー吸収のモデル化を行うと、エネルギーの釣合式は式(15)で表せる。

$$ES = E_y + E_{ds} + E_c + D \quad (15)$$

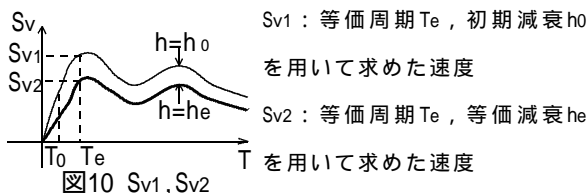
$ED=ES$ として式(15)を P_y について解くと以下の式(16)で必要耐力 P_y を求める式を得る。

$$P_y = \sqrt{\frac{(ED - D) \cdot Key}{0.5 + 2(\mu - 1) + 4(ND - 1)(\mu - 1)}} \quad (16)$$

式(16)における D に $D = 2h_0 m_e \times \frac{S_{V1}^2 T_e ND}{2}$ と、 $D = 2h_e m_e \times \frac{S_{V2}^2 T_e ND}{2}$ と、 $D = 2h_0 m_e \times \frac{S_{V1}^2 T_e ND}{2}$ と、 $D = 2h_e m_e \times \frac{S_{V2}^2 T_e ND}{2}$ との各組み合わせを用いて求められる4つの場合の必要耐力の精度検証を行う。

推定手法1	: $D = 2h_0 m_e \times \frac{S_{V1}^2 T_e ND}{2}$
推定手法2	: $D = 2h_0 m_e \times \frac{S_{V1}^2 T_e ND}{2}$
推定手法3	: $D = 2h_e m_e \times \frac{S_{V2}^2 T_e ND}{2}$
推定手法4	: $D = 2h_e m_e \times \frac{S_{V2}^2 T_e ND}{2}$

図-10は速度スペクトルを表しており、推定手法1から推定手法4に用いた最大応答速度 S_{v1} と S_{v2} について示している。



4.1 解析パラメータ

3.1において前述した解析パラメータ(表-1)により粘性減衰吸収エネルギーとして式(10)を用いた場合の各必要耐力算出の精度検証を行う。なお、推定手法1と3においては、最大応答速度 S_v を用いると過大に評価する為、低減率 h を0.5と設定する事により、 S_v を低減して必要耐力の算出を行った。

4.2 精度検証結果

図-12において推定手法1から推定手法4までの式を用いて粘性減衰吸収エネルギーを求め、式(16)により耐力 P_y を算出した推定値と地震応答解析を行い算出した応答値を比較した。図-12の左図はELCENTRO NSの地震波で減衰定数 $h=5\%$ として、右図はKOBE NSの地震波で減衰定数 $h=5\%$ として推定手法1から4までの推定値の精度検証を行っている。

図-12より、推定手法1、推定手法3が比較的良好な近似を示しているが、KOBE NSの地震波では T_{ey} が0.5(s)のとき、最大塑性率が大きくなるにつれ降伏震度が応答値よりも小さな値として算出される傾向がある。

より詳細に検討する為に、図-11において粘性減衰吸収エネルギーに関して推定手法1から4により求めた推定値と応答値とを比較する。図-11より応答値では粘性減衰吸収エネルギーは最大塑性率の増加に伴い減少していくが、推定手法では増大する傾向を示しており、推定手法2と4においてその傾向は顕著に表れていることが分かる。

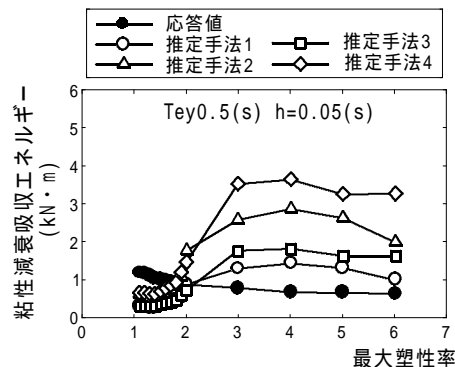


図-11 粘性減衰吸収エネルギーの比較

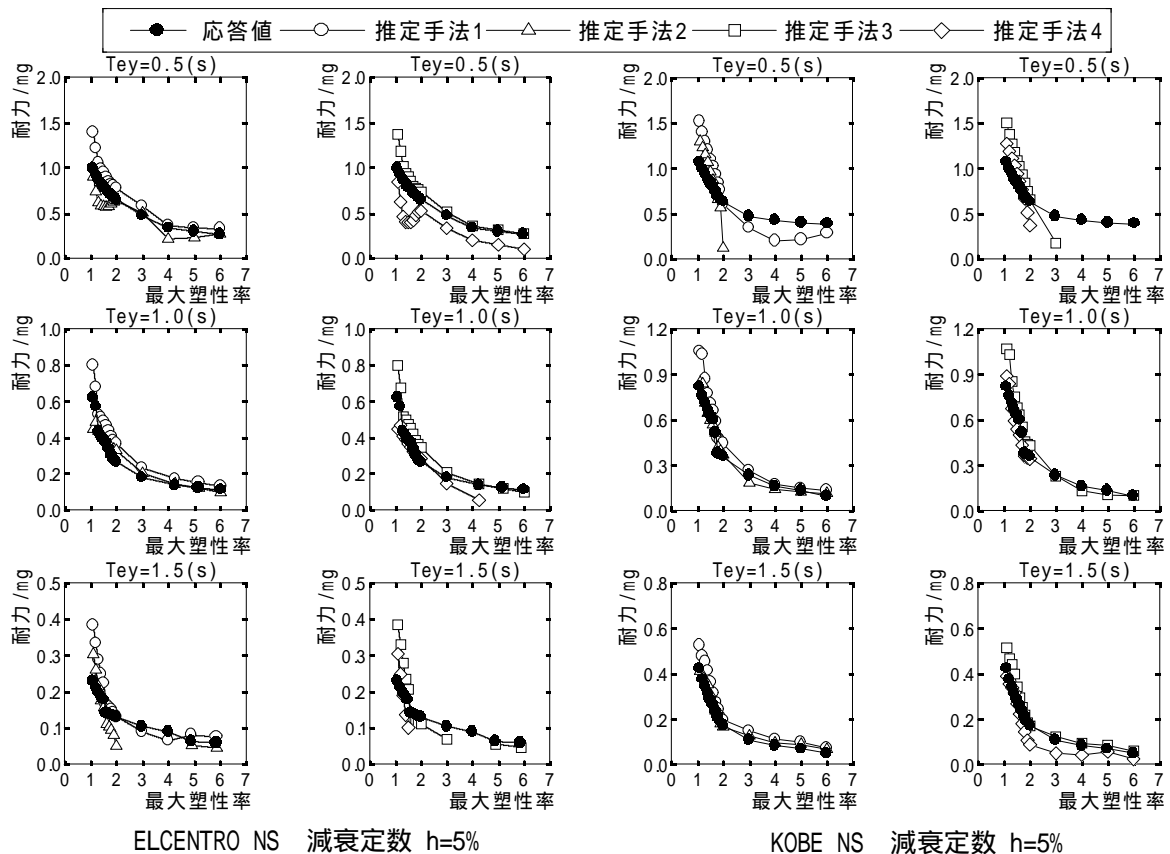


図-12 D の精度検証結果

その結果，推定手法2，4に関しては式(16)を用いて必要耐力を算出すると，最大塑性率が大きい範囲においては粘性減衰吸収エネルギーを過大に評価し，虚数解となる結果になったものと考えられる。

4.3 粘性減衰吸収エネルギーに関する考察

粘性減衰係数 c は前述した通り，等価剛性 K_e を考える事により塑性化に伴う粘性減衰吸収エネルギーの減少を考慮している。そこで提案した推定手法の問題点は速度の積分項にあると考えて以下で考察を行う。

速度項を考える際に，推定手法1と推定手法3では図-9の に示したように $\dot{y} = S_v (\omega = 0.5)$ として速度項を与えており，比較的良い精度が得られている。しかし最大塑性率の小さい範囲では応答値より大きく，また最大塑性率が大きくなるにつれ，応答値より小さい値が算出されている。従って， の値に関して一定に値を与えるのではなく，応答速度と塑

性率の関係を考慮して を導入する必要がある事が確認された。

推定手法2，推定手法4では式(14)より最大応答速度が発生する回数が多いことを表しているため，図-11に示すように塑性化が進むにつれて粘性減衰吸収エネルギーが増大する結果になったものと考えられる。

5.まとめ

本論では，文献1)で示された耐力算出式導出のためのエネルギー吸収のモデル化においてその精度検証を行い，モデル化の妥当性を検討した。また，粘性減衰吸収エネルギー E_h を減衰力のなした仕事として考え，速度依存項で表し，その問題点を検討した。

参考文献

- 1) 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算出法とその精度検証，日本建築学会構造系論文集 題532号，P.137-143，2000.6
- 2) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版株式会社，P.41-53，1981.6