

論文 RC建物の減衰特性に着目したエネルギー釣合に基づく必要耐力算出法とその精度

島尻 朋之*1 向井 智久*2 衣笠 秀行*3 野村 設郎*4

要旨: 本研究は、筆者らが既往の研究において提案している必要耐力算出式をより詳細に検討することを目的とする。そこで、まず1質点系にモデル化されたRC建物を対象にsin波1波による応答解析を行い、履歴及び粘性減衰のエネルギー吸収特性を検討し、塑性化に伴う各エネルギー吸収特性を把握した。その応答特性とエネルギー入力速度概念を用いて速度に依存した粘性減衰吸収エネルギーのモデル化を提案し、その精度を確認した。次に粘性及び履歴減衰を考慮した繰り返し数スペクトルを用いる手法の提案を行い、その有効性を確認した。

キーワード: 繰り返し数, 1質点系, エネルギー釣合, 減衰特性, 速度依存性

1. はじめに

筆者らは既往の研究において、地震動が構造物に及ぼす破壊力の指標(以後、地震動の荷重)をエネルギー入力量 ED と繰り返し数 ND により評価し、1質点系にモデル化されたRC構造物の応答変形量がある値以下となるのに必要な耐力の算出法を提案している。この算出方法での粘性減衰吸収エネルギーのモデル化において弾性時に適用できる式を弾塑性時に用いている点で検討の余地がある。そこで本論では、第一にエネルギー入力速度概念に基づいて速度に依存した粘性減衰吸収エネルギーの算出方法の提案とその精度検証を行う。また、既往の研究で必要耐力を算出する際に使用する ED・ND は減衰定数を5%としたスペクトルから推定していたが、ED・ND は減衰に依存していると考えられる。そこで第二に ED・ND の減衰依存特性を検討し、目標塑性変形に応じた減衰定数のスペクトルから ED・ND を推定し、必要耐力算出法の

精度検証を行う。

2. 既往の必要耐力算出式

既往の研究では、地震動の威力をエネルギー入力量 ED と繰り返し数 ND で評価している。ここで、繰り返し数 ND はエネルギー入力量 ED と等価周期 T_e (図-1)あたりに入力されるエネルギー入力量の最大値 ΔE_{max} を用いて(1)式より算出する。

$$ND = ED / \Delta E_{max} \tag{1}$$

次に、正負の最大変位の平均値 δ_D を振幅として定常振動する構造物にお

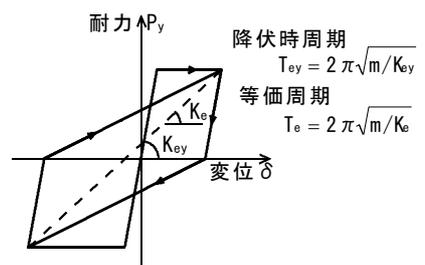


図-1 降伏時周期と等価周期

けるエネルギー吸収 ES のモデル化により得られるエネルギー釣合式を(2)式で示す。

$$ES = E_y + E_{ds} + E_c + E_h \tag{2}$$

*1 東京理科大学	理工学部建築学科	(正会員)
*2 東京理科大学	理工学部建築学科	助手 工博 (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)

$$E_y = 0.5P_y \delta_y \quad E_{ds} = 2P_y (\delta_D - \delta_y)$$

$$E_c = 4P_y \xi (ND - 1) (\delta_D - \delta_y)$$

$$E_h = 2\pi h_0 P_y \delta_D ND$$

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

ここで, P_y は降伏耐力, δ_y は降伏変位, h_0 は初期減衰定数, ξ はエネルギー吸収性能を表すループ面積係数である。ED=ES として (2) 式を P_y について解くと (3) 式が得られる。

$$P_y = \sqrt{\frac{ED \cdot K_{ey}}{0.5 + 2(\mu - 1) + 4\xi(ND - 1)(\mu - 1) + 2\pi h_0 \mu ND}} \quad (3)$$

(3) 式を用いて, 平均塑性率 μ を保証するのに必要な耐力 P_y を算出できる。

3. 各エネルギー吸収成分の特性

建物の最大変形は, 瞬間入力エネルギーが最大の時にほぼ発生する。そこで本章では, sin 波 1 波を 1 質点系モデルに入力する場合について, 入力エネルギーが終了時に各エネルギー吸収成分の特性を検討する。

3.1 解析パラメータ

sin 波による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。なお, 平均塑性率とは正負の最大塑性率の平均値である。

質量 (kN・sec ² /cm)	9.805
最大加速度 (cm/sec ²)	800
sin波周期 (sec)	0.5, 1.0, 1.5
建物固有周期 (sec)	0.5, 1.0, 1.5
平均塑性率	1, 3, 5
減衰定数h (%)	3, 5

3.2 各エネルギー成分の吸収速度

本節では, 各エネルギー成分の収束度合 (吸収速度) について検討する。図-2は sin

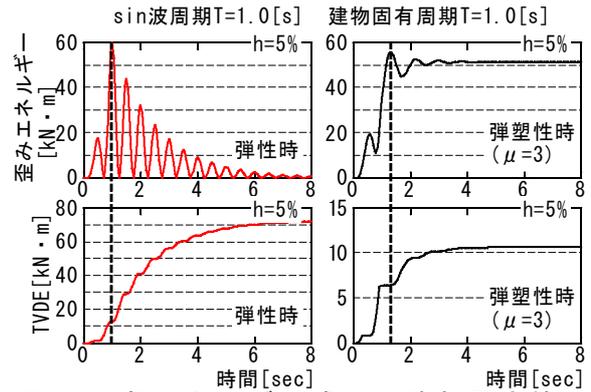


図-2 各エネルギー成分の時刻歴応答

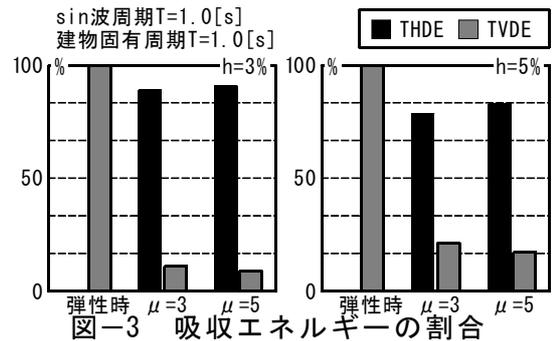


図-3 吸収エネルギーの割合

波周期 $T=1.0$ (s), 建物固有周期 $T=1.0$ (s) の弾性歪みエネルギー及び塑性時 ($\mu=3$) の履歴吸収エネルギー (THDE), 粘性減衰吸収エネルギー (TVDE) の時刻歴を示す。なお図中の破線は, 弾性歪みエネルギー及び THDE が最大となる時刻である。図-2より, THDE は, 弾性時, 塑性時共に sin 波 1 波に対してほぼ 1 周期でエネルギーを吸収する傾向が見られることから吸収速度が入力に大きく影響する。また TVDE は, 弾性時においてグラフの傾きが緩やかであることから, sin 波 1 波に対して数回に分割しながら歪みエネルギーが放出した分を吸収しており, 吸収速度と入力との相関性は小さい。それに対して塑性時は, 弾性時に比べ 1 周期で吸収するエネルギー量の割合が増加しており, 塑性化に伴って吸収速度と入力との相関性が大きくなることが確認された。

3.3 各エネルギー吸収割合

図-3は, sin 波周期 $T=1.0$ (s), 建物固有周期 $T=1.0$ (s) の各パラメータにおける吸収エネルギー分布について示す。図-3から

入力終了時において、塑性化が進むにつれて粘性減衰吸収エネルギーの割合が徐々に減少している。また、減衰定数が増加すると TVDE の割合は増加しており他のケースにおいても同様の結果を得た。

4. 粘性減衰吸収エネルギー E_h の検討

既往の研究¹⁾では、粘性減衰吸収エネルギー E_h が弾塑性時においても最大変位に依存すると仮定して簡易的に(4)式より算出している。

$$E_h = 2\pi h_0 P_y \delta DND \quad (4)$$

本章では、粘性減衰吸収エネルギー E_h に振動方程式から求まる減衰力のなした仕事 D として、速度依存項への修正を考える。振動方程式の両辺に $dy = \dot{y}dt$ を乗じて地震継続時間で積分すると(5)式のようにエネルギーに関する釣合式が得られる。

$$\frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}ky^2 + \int_0^t c\dot{y}^2 dt = \int_0^t (-m\ddot{y}o^2) \quad (5)$$

(5)式における減衰力のなした仕事 D について以下に示す。

$$D = \int_0^t c\dot{y}^2 dt \quad (6)$$

(a) 粘性減衰係数 c

(6)式中の粘性減衰係数 c は(8)式で算出する。

ω_e : 等価円振動数, K_e : 等価剛性

$$\omega_e = \sqrt{K_e/m} \quad (7)$$

$$c = 2h_0 m \omega_e \quad (8)$$

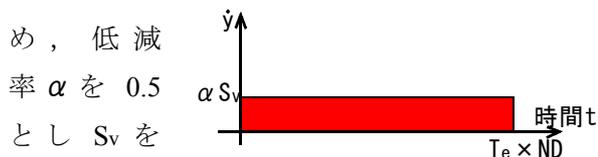
なお、(7)式の円振動数に ω_e を用いることで、3章で得られた塑性化に伴う粘性減衰吸収エネルギーの減少を考慮している。

(b) 速度 \dot{y}

(6)式における速度 \dot{y} を(9)式で示す。

$$\dot{y} = \alpha S_v \quad (\alpha = 0.5) \quad (9)$$

なお、最大応答速度 S_v を直接用いると粘性減衰吸収エネルギーを過大に評価するた



め、低減率 α を 0.5 とし S_v を低減する。図-4 (6)式中の \dot{y} の定義(9)式における最大応答速度 S_v は各減衰の速度応答スペクトルから与える。この際に、塑性化に伴う応答速度の低減を考慮する必要はある。文献2)において、(9)式の最大応答速度 S_v の項に等価周期、初期減衰から求めた速度 S_{v1} (図-5)を用いて推定した結果、塑性率の大きい範囲において応答値よりも小さい値をとる傾向が見られた。

そこで本論では、3章の結果をふまえ履歴減衰による応答速度の低減を見込み、 D の S_v の項に S_{v2} を用いて精度検証を行う。 S_{v2} に用いる等価減衰定数 h_e は以下の式で表す³⁾。

$$h_e = 0.2(1 - 1/\sqrt{\mu}) + h_0 \quad (10)$$

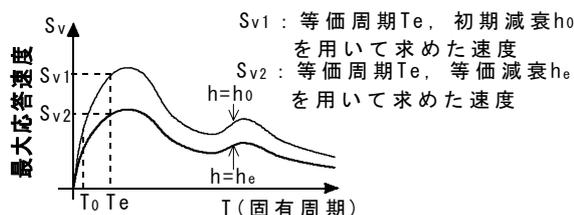


図-5 速度応答スペクトル

(c) 提案する必要耐力算出式

D は(6), (7), (9)式より(11)式で表せる。

$$D = 2h_0 m \omega_e \times \alpha^2 S_v^2 T_e N D \quad (11)$$

上式において地震継続時間 t をエネルギー入力速度概念に基づき $T_e \times ND$ とすることで繰り返し挙動を考慮した。(2)式のエネルギー釣合式は(12)式のように書き換えられる。

$$ES = E_y + E_{ds} + E_c + D \quad (12)$$

$ED=ES$ として(12)式を P_y について解くと、必要耐力 P_y は(13)式で表される。(13)式の D に(11)式を用いて必要耐力 P_y の精度検証を行う。

$$P_y = \sqrt{\frac{(ED - D) \cdot Key}{0.5 + 2(\mu - 1) + 4\xi(ND - 1)(\mu - 1)}} \quad (13)$$

なお、本章では ED 及び ND には地震応答解析から得られる応答値を用いて、粘性減衰吸収エネルギーに(11)式を用いることの妥当性を検討する。

4.1 解析パラメータ

地震応答解析のパラメータを表2に示す。

表-2 解析パラメータ

重量mg (kN)	10
降伏時周期 T_{ey} (sec)	0.5, 1.0, 1.5
減衰定数h (%)	3, 5, 7
最大塑性率 μ	1.1~2.0(0.1刻み) 2.0~6.0(1.0刻み)
使用地震波	EL Centro NS JMA KOBE NS TAFT EW

復元力特性は3.1と同様

であり、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。

4.2 精度検証結果

図-6において、本章で提案した(11)式を用いて粘性減衰吸収エネルギーを求め(13)式により耐力 P_y を算出した推定値と、地震応答解析から得られる応答値を比較した。図-6に(a)は4章の提案式、(b)は既往

の研究¹⁾による既往式を用いて推定した降伏耐力 P_y の精度検証結果を示す。なお、使用地震波は EL Centro NS, JMA Kobe NS 成分で、減衰は 5%としたケースについて示す。

4章の提案式では塑性率が大きい範囲においても推定値は応答値とほぼ等しく、良い精度で推定できるよう改善されている。次に、既往式ではどの範囲においても精度良く推定することができたが、新しく提案した(13)式では塑性率が小さい範囲において応答値よりも大きく評価する傾向が見られた。この結果、さらに精度を上げるためには速度の低減率 α を塑性率に応じた値にする必要があると考えられる。この他のケースにおいても同様の傾向が確認された。

5. 地震動の威力の減衰依存特性

必要耐力算出式は(3)式で示す通り、 ϵ

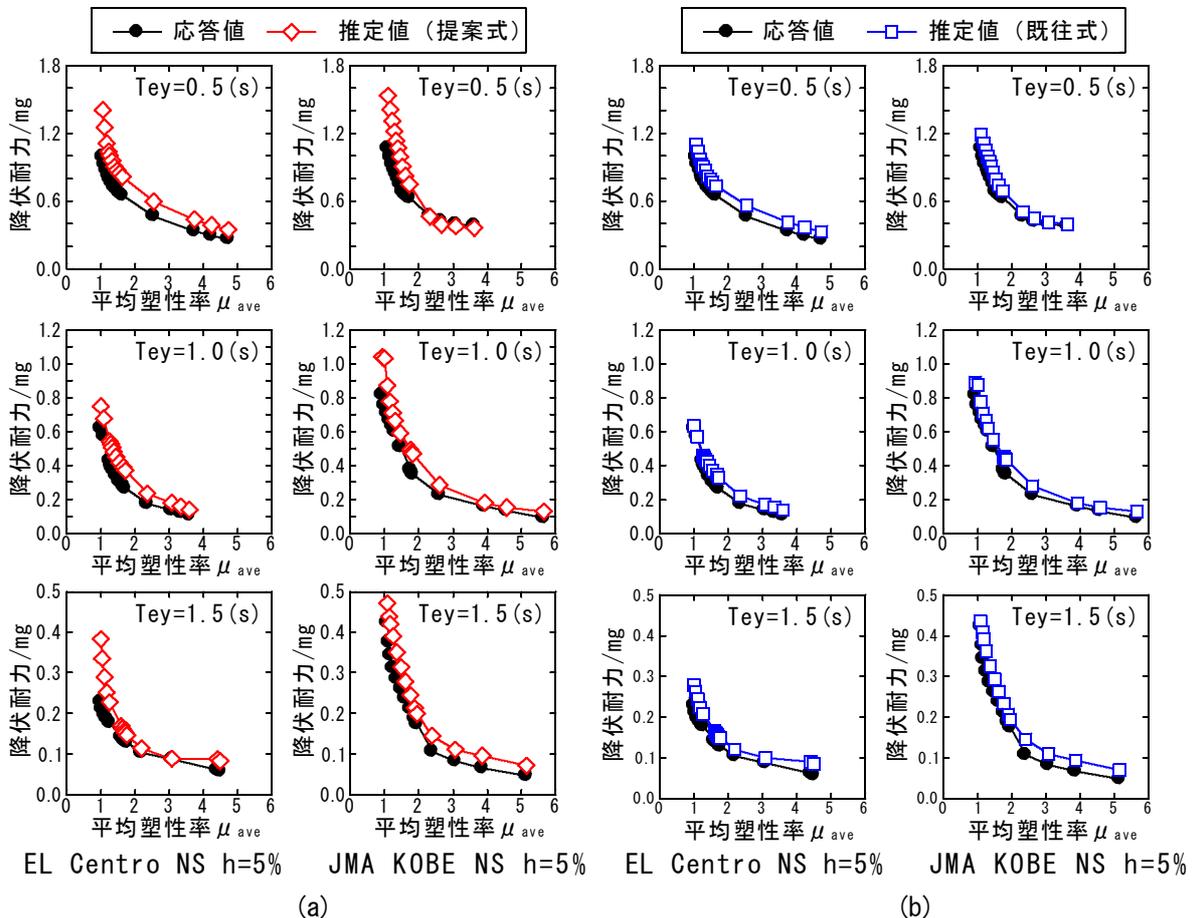


図-6 Dの精度検証結果

エネルギー入力量 ED と繰り返し数 ND の関数であり、それらの値の算出は重要である。既往の研究では、ED 及び ND は減衰定数 5%におけるそれぞれの弾性応答スペクトルからその値を決定していたが、ED 及び ND の算出方法においてより詳細な検討が必要と考えられるため、ここでは ED 及び ND の減衰依存特性について基礎的検討を行う。

(a) エネルギー入力量 ED の減衰依存特性

ED には減衰依存特性があることから、秋山らは減衰定数 10%の弾性応答スペクトルから VE (ED の速度換算値) を算出している⁴⁾。ここで、図-7は Taft EW 成分の VE スペクトルを示しており、減衰の増大によってスペクトルが平滑になることが確認できる。図-8は (10) 式から得られる等価減衰定数 h_e の塑性率に対する分布を示しており、 h_e の最大値が 10%を超えるものも見られる。これは他の地震動についても同様の結果が得られた。従って、減衰定数 20%における弾性応答スペクトルからエネルギー入力量 ED を算出することとする。

(b) 繰り返し回数 ND の減衰依存特性

図-9は Taft EW 成分の ND スペクトルを表しており、減衰定数の増大に伴い ND の値は増加することが確認できる。これは他の地震動についても同様の傾向が見られた。従って、履歴及び粘性減衰を考慮した等価減衰定数から ND の値を決定することで地震動の威力を低減できる。

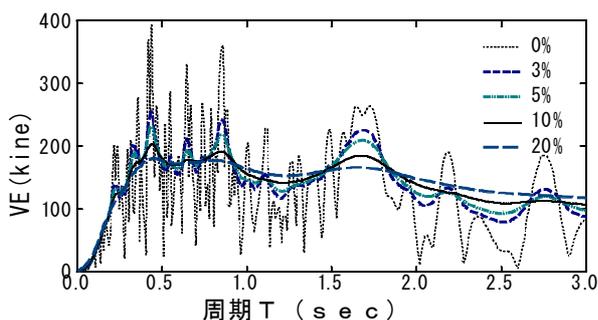


図-7 VEスペクトル

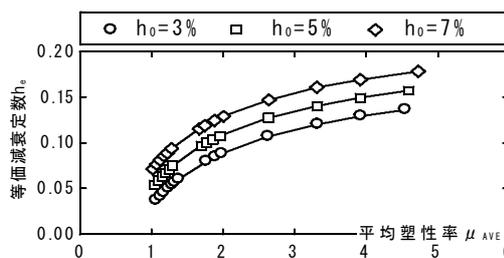


図-8 等価減衰定数の分布

6. 減衰特性を考慮した必要耐力の精度

本章では、5章に示した ED・ND の減衰特性を考慮して、ND の値を減衰定数 5%と定めた場合の弾性応答スペクトルから算出する場合(手法1)と、ND の値を(10)式を用いて求めた等価減衰定数における弾性応答スペクトルから算出する場合(手法2)の耐力 P_y について精度検証を行い、ND の減衰依存特性が必要耐力算出に及ぼす影響について検討する。

6.1 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-2)により(3)式を用いた場合の必要耐力 P_y の精度検証を行う。なお、エネルギー入力量 ED は減衰定数 20%における弾性応答スペクトルから求め、繰り返し数 ND は手法1と、手法2の2通りで決定する。

6.2 精度検証結果及び考察

図-10において応答値と手法1及び手法2により算出した時の耐力 P_y を比較した。図-10の左図は EL Centro NS 成分(減衰定数 5%)、右図は JMA KOBE NS 成分(減衰定数 5%)の結果を示す。図-10より、手法2を用いたときの方が応答値に近い値となる結果

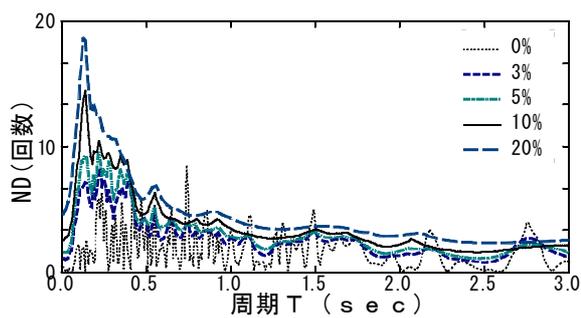
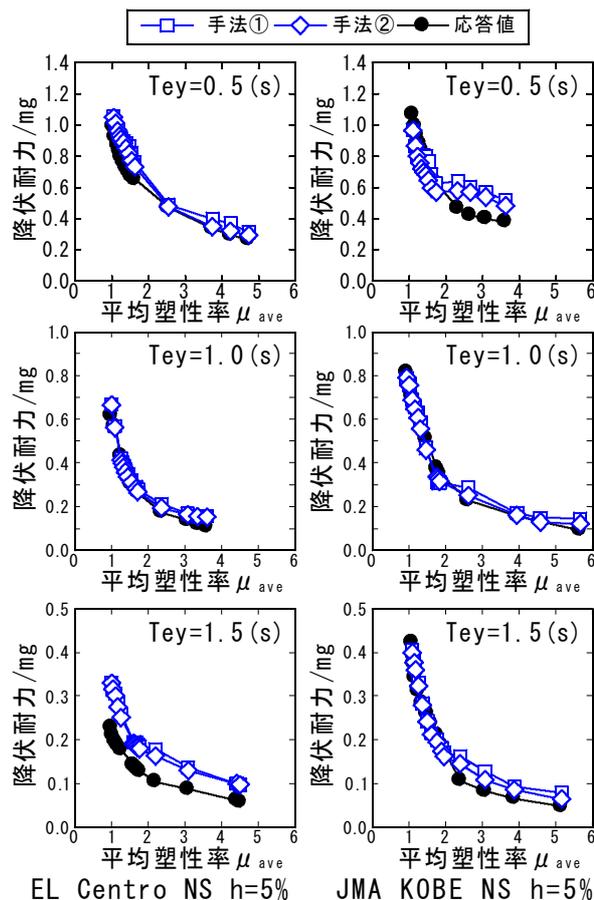


図-9 NDスペクトル

が得られた。これは他の地震動においても同様の結果が確認された。しかし、EL Centro NS 成分の降伏時周期 $T_{ey}=1.5(s)$ のケースは応答値よりも大きく評価するケースが見られた。そこで4章において既往式のモデル化の妥当性は確認されている為、ED と ND をスペクトルより推定した値の精度をより詳細に検討した。図-11において、降伏時周期 $T_{ey}=1.5(s)$ のケースにおける ED 及び ND の応答値との比較を示す。図-11より、ED の推定値は概ね応答値を捉えている。しかし EL Centro NS 成分の ND の値を応答値に比べ小さく評価したため、結果として耐力 P_y の精度が落ちたものと考えられる。等価減衰定数を用いたが ND の値を応答値より小さく評価した要因は、(10)式が地震動の特性に左右されるためと考えられる。従って、地震動に応じたより適切な等価減衰定数の決定方法に関する検討が必要である。

7. まとめ

本報では、塑性化に伴う減少を考慮した速度及び固有振動数と、繰り返し数 ND を用いて粘性減衰吸収エネルギー E_h を速度依存項として評価した。そして、その E_h を用いて算出した降伏耐力 P_y の精度検証を行い、その精度が妥当であることから、 E_h を速度依存項として評価できることを確認した。また、地震動の威力である ED ・ ND の減衰依存特性について検討した後、減衰定数 20%の応答スペクトルから算出した ED、及び等価減衰定数の弾性応答スペクトルから算出した繰り返し数 ND を用いて耐力 P_y を求め、精度検証を行い繰り返し数 ND は塑性変形に応じた等価粘性減衰定数を用いて算出することができることを確認した。



EL Centro NS h=5% JMA KOBE NS h=5%
図-10 耐力 P_y の精度検証結果

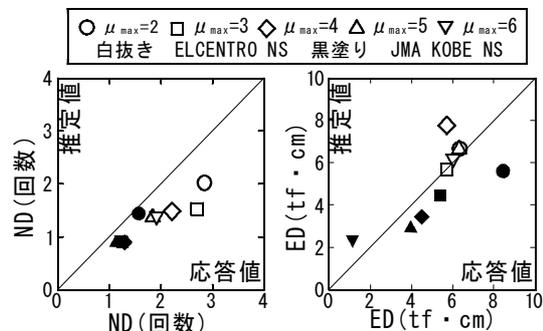


図-11 EDおよびNDの比較

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 第 532 号, P.137-143, 2000.6
- 2) 太田健吾, 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: エネルギー入力速度に基づいたエネルギーの釣り合い手法に関する研究(粘性減衰吸収エネルギー項 E_h の修正), 日本建築学会関東支部研究報告集, No.2038, pp221-224, 2002.3
- 3) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森北出版株式会社, p.41-53, 1981.6
- 4) 秋山宏: エネルギーに基づく建築物の耐震設計, p.16-17, 1999.11