

論文 速度依存型ダンパーを用いた純ラーメン多層RC造建物の地震時 応答特性

古間 直希*1・向井 智久*2・衣笠 秀行*3・野村 設郎*4

要旨: 本論では、速度依存型ダンパーとして Voigt モデルを用いた場合の多層 RC 造建物の応答性状を、層が劣化を起こす場合(劣化モデル)を含めて基礎的に検討した。劣化の種類によって RC 躯体自体の変形の集中則は異なっていたが、ダンパーを付加することで最大応答変形を小さく抑え、劣化のないモデルとほぼ同等のダンパーの効果が得られた。また、劣化のないモデルにおける代表高さの最大応答変形を、筆者らがこれまでに提案している入力エネルギー量 ED, 繰返し数 ND を用いて適切に説明できることを確認した。

キーワード: 速度依存型ダンパー, Voigt モデル, ピンチングモデル, 耐力低下モデル

1. はじめに

速度依存型ダンパーは、風振動等の微振動に対して制振効果を発揮し、居住性能の向上を可能にすると共に、地震動に対しても減衰性能を発揮するとされ、近年耐震性能部材としても用いられている。通常、ダンパーを取り付ける躯体は健全な建物を想定していることが多く、RC 構造特有の劣化モデルに対する検討はほとんどないのが現状である。そこで本論では、劣化がない健全な RC 建物(以下標準モデル)だけではなく、劣化を起こす RC 建物(以下劣化モデル)も想定し、速度依存型ダンパーを取り付けた際の多層 RC 造建物の地震時応答特性について検討する。

2. 解析概要

2.1 標準モデル

解析建物は、4 層及び 12 層の粘弾性ダンパーを有する純ラーメン多層 RC 造建物であり、せん断多質点系でモデル化する(図-1)。なお、RC 躯体については文献 1)に示す平面フレームモデルを対象としている。RC 躯体のせん断多

質点系への縮約手順を以下に示す。

(1) フレームモデルに対して、 A_i 分布に基づく静的非線形解析を行い各層の層せん断力-層間変形関係(以下 Q_i - δ_i 関係)を算出する。

(2) 文献 2) の手法を用いて Q_i - δ_i 関係を Tri-linear 化し、各層の降伏時剛性 K_{eyi} 及びせん断耐力 Q_{yi} 、降伏後剛性を決定し、Bilinear 型の骨格曲線を決定する。

表-1に縮約したせん断多質点系の諸元を示す。なお、RC 躯体の復元力特性は Degradating-Bilinear モデルとし、除荷時剛性 K_i' は、式(1)で決定する。

$$K_i' = K_{eyi} / \sqrt{\mu} \quad (1)$$

ただし、 μ : 塑性率

粘弾性ダンパーは、図-1に示す Voigt モデルで表し、各層に付加する。ダンパー部を Voigt モデルで表すことは、粘弾性ダンパーの振動数依存特性を考慮できないことになる。しかし既往の研究として共振時の振動数、フレームの固有円振動数等に基づき Voigt モデルの設定を行うことで、粘弾性ダンパーの実現象をおおよそ捉えることが出来るとする報告がなされている³⁾⁴⁾。

*1 東京理科大学大学院生 理工学研究科建築学専攻

*2 独立行政法人 建築研究所 構造グループ 研究員 博(工)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科 助教授 工博

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博

これらの研究結果に基づけば、Voigt モデルを用いた建物モデルに対して応答性状を把握することは十分に意味があるものと考えている。

ダンパーの剛性を示す弾性バネ(以下ダンパー剛性部)は剛性 K_{di} を有し、ダッシュポットの粘性係数は C_{di} である。ダンパーの粘性係数 C_{di} は式(2)で決定する。

$$C_{di} = 2h_d \frac{K_{eyi}}{\omega_{ey}} \quad (2)$$

ただし、 h_d : ダンパーの減衰定数,

ω_{ey} : RC 躯体の降伏時固有円振動数

表-2に標準モデルの解析パラメータを示す。使用地震動は El Centro1940 NS成分(以下ELCE), JMAKobe1995 NS成分(以下KOBE), Taft 1952 EW成分(以下TAFT)を最大地動速度が 25, 50, 75cm/s に基準化して用いる。また、ダンパー剛性部の RC 躯体の降伏時剛性に対する比 $\gamma_d (\gamma_d = K_{di} / K_{eyi})$, ダンパーの減衰定数 h_d をパラメータとする。なお、劣化モデルを扱う場合、RC 躯体の粘性減衰は初期剛性比例型が多く用いられているが、初期剛性の値が応答結果に大きく影響を与えるという報告もなされている。本論ではダンパー付加による応答の変化に着目するため、粘性減衰の影響が応答結果を変化させることを避け、標準モデル、劣化モデル共に減衰定数を 0% とする⁵⁾。

2.2 劣化モデル

劣化型の復元力特性としては、図-2に示すピンチング及び耐力低下の復元力特性を有するモデルを用いる。

(a) ピンチングモデル

降伏後の繰り返し履歴において除荷後せん断力が 0 になった後(図-2(a), A 点), 剛性 K_s で再載荷される。剛性 K_s は式(3)で決定する。

$$K_s = \frac{Q_D}{(\delta_D - \delta_0)} \cdot \left(\frac{1}{\mu} \right)^\lambda \quad (3)$$

ただし、 δ_D : 経験した最大応答変形,

δ_0 : せん断力が 0 時の変位

Q_D : 経験した最大応答せん断力

本論においては、 $\lambda=0.5$ とする。

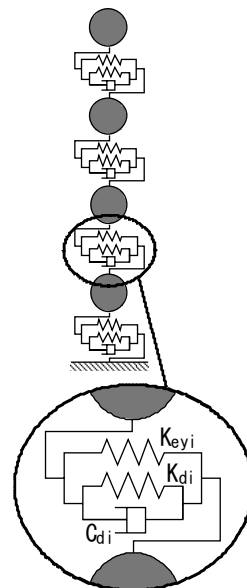


図-1 せん断多質点系モデル

表-1 せん断多質点系モデル概要

層	K_{eyi} (kN/m)	Q_y (kN)	W (kN)
4	46089	660	1475
3	37069	960	1159
2	38881	1176	1159
1	47853	1320	1191

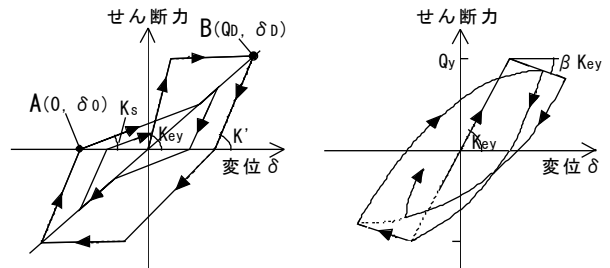
(a) 4層モデル

層	K_{eyi} (kN/m)	Q_y (kN)	W (kN)
12	93111	814	1671
11	106547	1218	1406
10	110864	1555	1406
9	113204	1844	1406
8	117647	2099	1406
7	133232	2327	1406
6	125223	2539	1406
5	133129	2720	1406
4	147377	2892	1406
3	154256	3103	1406
2	153263	3348	1406
1	232559	3426	1429

(b) 12層モデル

表-2 解析パラメータ(標準モデル)

層数	4層, 12層
地震動の種類	ELCE, KOBE, TAFT
地震動のレベル	25cm/s, 50cm/s, 75cm/s
γ_d	0.2, 1.0
h_d	5%, 20%



(a) ピンチング (b) 耐力低下

図-2 劣化層の復元力特性

表-3 劣化モデルの復元力特性

	ピンチングモデル	耐力低下モデル
劣化層	図-2(a)	Ramberg-Osgood ($\beta = -0.1$)
劣化層以外	Degrading-Bilinear	Ramberg-Osgood ($\beta > 0$)

(b) 耐力低下モデル

全層について Ramberg-Osgood モデルとし(表-3参照), 耐力低下層の降伏後の耐力低下の程度を降伏後剛性に対する降伏時剛性 K_{eyi} の比 β (図-2(b))で表す。 β の値は実験等を用いた詳細な検討が必要であるが、本論は基礎的な検討であることから、地震応答解析結果及び文献(6)を参考にし、耐力低下層で $\beta = -0.1$ と仮定する。また劣化層は、曲げ柱及びせん断柱が混在し、層の耐力が低下後も曲げ柱によりある程度のエ

エネルギー吸収が見込めるものを想定している。

なお、ピンチングモデルは劣化層以外は Degradation-Bilinear モデルである(表-3参照)。また耐力低下モデルにおいて、全層の耐力低下が起きない場合の応答性状が標準モデルの応答性状に近くなるように Ramberg-Osgood カーブのパラメータを決定している。

解析建物としては4層建物を扱う。劣化層は、ピンチングモデルでは3層、耐力低下モデルは1, 3層とする。なお、劣化層として3層を対象としているのは、4層モデルにおいて3層が最も層間変形が大きかったためである。また、表-4に劣化モデルの解析パラメータを示す。

3. 標準モデルの動的応答特性

図-3は ELCE, 75cm/s の解析ケースにおける各層の最大応答変形 δ_{maxi} , 入力エネルギー ED_i , 履歴吸収エネルギー $THDE_i$, ダンパーの粘性減衰吸収エネルギー $TVDE_i$ について、ダンパー付加前の解析結果と共に示している。

まず δ_{maxi} に着目する。RC 躯体の粘性減衰を0%としているため、ダンパー付加前は4, 12層モデルそれぞれにおいて変形が集中する層が確認できる(4層モデル:3層, 12層モデル:11層)。しかし、ダンパーを付加することで δ_{maxi} は低減され、変形が集中する層は見られなくなる。特にダンパーの減衰定数 h_d が大きい場合、 δ_{maxi} は低減されている。また、ここに示したケースにおいては、 γ_d の値の違いにより δ_{maxi} の大きな変化は見られず、 γ_d が増加することで必ずしも応答は低減されないと言える。次に ED_i について見ると、ダンパー付加前は4, 12層モデル共に中間層の ED_i の値が大きい。ダンパーを付加することで上層部の ED_i が大きくなる傾向が見られる。次に $THDE_i$ について見ると、まず δ_{maxi} との相関性が確認できる。また12層、 $h_d=20\%$ の際に $THDE_i$ が各層でほぼ0となり、RC 躯体が弾性となっていることが分かる。最後に $TVDE_i$ について検討する。最下層に近づくに従い、 $TVDE_i$ の値が大きい。また、

表-4 解析パラメータ(劣化モデル)

層数	4層
地震動の種類	ELCE, KOBE, TAFT
地震動のレベル	50cm/s
γ_d	0.2
h_d	5%, 20%

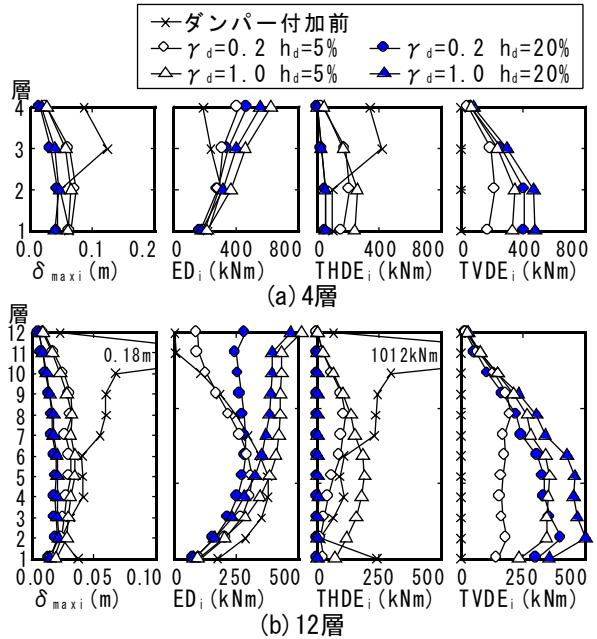


図-3 各層最大応答変形及びエネルギー応答 (ELCE 75cm/s 標準モデル)

この傾向は h_d が大きくなるほど顕著である。

続いて繰り返し数 ND_i について検討する。既往の研究により ND_i は次式で算出できる。

$$ND_i = \frac{ED_i}{\Delta E_{maxi}} \quad (4)$$

ここで、 ΔE_{maxi} とは、単位時間 ΔT の間のエネルギー入力量の最大値である。なお本論では ΔT を、各層の正負最大応答変形点に基づく割線剛性をを用い、固有

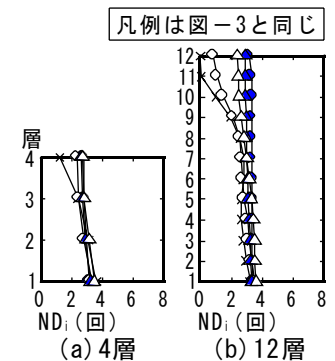


図-4 ND 分布 (ELCE 75 cm/s 標準モデル)

値解析により算出して求められる周期 T_i とした。図-4は同じく ELCE, 75cm/s の解析ケースにおける各層 ND_i 分布を示している。4, 12層モデルそれぞれにおいておおよそ各層の ND_i の値は一定である。また、12層モデルにおい

ダンパー付加前、及び $h_d=5\%$ の際に上層の ND_i が他の層と比べ小さな値となる傾向が見られるが、 $h_d=20\%$ の際はおおよそ各層は一定であり、 h_d が大きくなるほど各層の ND_i は一定となる傾向があるといえる。以上の傾向は他の地震動においても見られた。

4. 劣化モデルの動的応答特性

4.1 ダンパー付加前の応答特性

図-5及び図-6は、(a)ELCE 50cm/sにおけるピンチングモデル、(b)ELCE 50cm/sにおける3層耐力低下モデル、(c)KOBE 50cm/sにおける1層耐力低下モデルについて、各層の最大応答変形 δ_{maxi} 、入力エネルギー ED_i 、履歴吸収エネルギー $THDE_i$ を、劣化なしモデルの応答値と共に示す。また、図-7に劣化モデルにおける劣化層の層せん断力-層間変形関係($Q_i-\delta_i$ 関係)と劣化なしモデルの $Q_i-\delta_i$ 関係を比較したものを示す。まず、ピンチングモデル(図-5, 6(a))について見ると、劣化モデルと劣化なしモデルの ED_i の値がおおよそ等しいにも関わらず、劣化モデルの4層の δ_{maxi} が大きな値となっている。これは、3層がピンチングすることでエネルギー吸収性能が低下し、4層でその分のエネルギー吸収を補ったためであると考えられる。そこで図-6(a)において $THDE_i$ の値を確認すると、劣化なしモデルと比較し3層の $THDE_i$ の値が小さくなり、4層の $THDE_i$ の値が大きくなっており、前述のことが確認できる。また、図-7(a)において劣化層(3層)の $Q_i-\delta_i$ 関係を確認すると、劣化モデルのピンチング現象が確認できる。

次に3層耐力低下モデル(図-5, 6(b))について確認する。ピンチングモデルと同様、劣化の有無に関わらず ED_i の値はおおよそ等しいが、 δ_{maxi} は劣化層である3層に集中しており、 $THDE_i$ によるエネルギー吸収も3層で大きい。したがって耐力低下モデルは、ピンチングモデルと違い、吸収できなくなったエネルギーを他の層に分散させるのではなく、劣化層が変形することによりエネルギー吸収するものと考えら

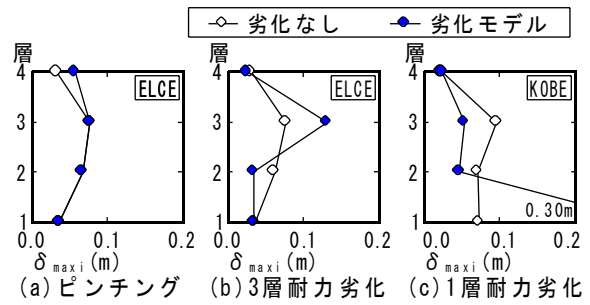


図-5 劣化モデルの各層最大応答変形

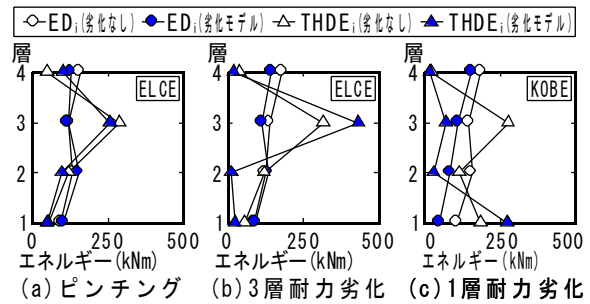


図-6 劣化モデルの各層エネルギー応答

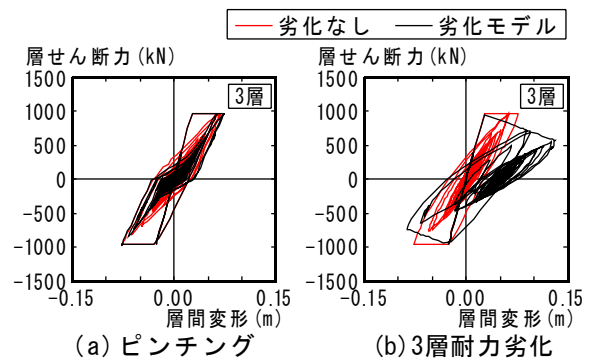


図-7 劣化層の層せん断力-層間変形関係

れる。その結果 δ_{maxi} は大きくなり、損傷が劣化層に集中する。図-7(b)により劣化層(3層)の $Q_i-\delta_i$ 関係を確認すると、劣化モデルの耐力低下が確認でき、劣化のないモデルと比較し、正側で最大応答変形が大きくなり、片寄りが生じている。最後に、1層耐力低下モデル(図-5, 6(c))について確認する。 ED_i の値は、劣化モデルの方が小さな値であるが、3層低下モデルと同様、劣化層である1層の δ_{maxi} が大きくなりかつ $THDE_i$ の値も大きいことが分かる。また、3層の δ_{maxi} は小さくなっている。

4.2 ダンパー付加後の応答特性

図-8は、3章の図-3で示したものと同一ものを、図-5及び図-6で示したケースについて示している。また、図-9は、劣化層の $Q_i-\delta_i$ 関係を、劣化なしモデルの $Q_i-\delta_i$ 関係と共に示

している。まず(a)ピンチングモデルについて検討する。 δ_{maxi} に着目すると、 h_d が大きくなることで δ_{maxi} の低減が見られ、ダンパーの効果を確認できる。またエネルギー応答性状は、**図-3**における標準モデル(ダンパー付加後)の応答性状と類似しており、上層の ED_i が大きいく、下層で $TVDE_i$ が大きいことが確認できる。また、**図-9(a)**により劣化層の $Q_i-\delta_i$ 関係を確認すると、最大変形が小さく抑えられることで、劣化なしモデルと履歴形状はおおよそ等しく、ピンチングモデルにおいても効果的にダンパーが機能していると言える。

次に耐力低下モデルについて検討する(**図-8(b)(c)**)。ダンパー付加前は、劣化層において大きな変形の集中と共に、 $THDE_i$ が大きな値となっているが、ダンパー付加により損傷の集中が緩和されてる。エネルギー応答性状も、上層の ED_i が大きく、下層で $TVDE_i$ が大きいことが確認でき、**図-3**の標準モデルの応答性状と類似している。耐力低下により損傷の集中がある建物に対して、粘弾性ダンパーを用いることが有効であると言える。**図-9(b)**により $Q_i-\delta_i$ 関係を確認すると、やや劣化モデルの最大変形が劣化なしモデルと比べ大きくなっているものの、耐力低下モデルにおけるダンパーの有効性が確認できる。また、**図-10**に3層耐力低下モデル、ELCE 50cm/s、 $h_d=5\%$ の解析ケースにおける劣化層のダッシュポット部負担せん断力-層間変形関係(以下 $Q_{di}-\delta_i$ 関係)及び劣化なしモデルの $Q_{di}-\delta_i$ 関係と共に示す。**図-10**より劣化モデルと劣化なしモデルの $Q_{di}-\delta_i$ 関係の形状はおおよそ等しく、劣化層内においてもダンパーが有効に機能していることが分かる。

5. エネルギー設計法の為の基礎的検討

5.1 最大応答変形とED, NDとの関係

本項では、標準モデルに着目し、代表高さ(1次の刺激関数 $\beta_{1,u}=1.0$)の応答変形について検討を行う。**図-11**は、ELCEにおける代表高さの最大応答変形、建物全体の総入力エネルギー、

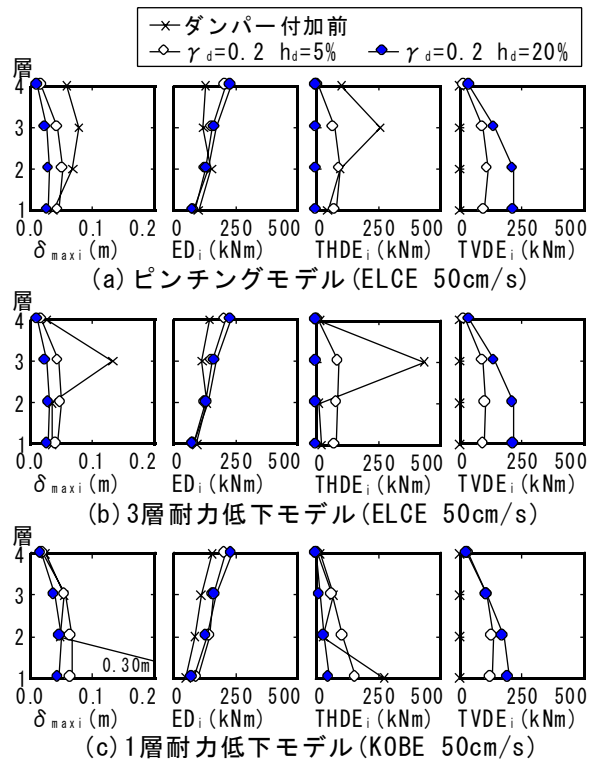


図-8 各層最大応答変形及びエネルギー応答 (劣化モデル ダンパー付加後)

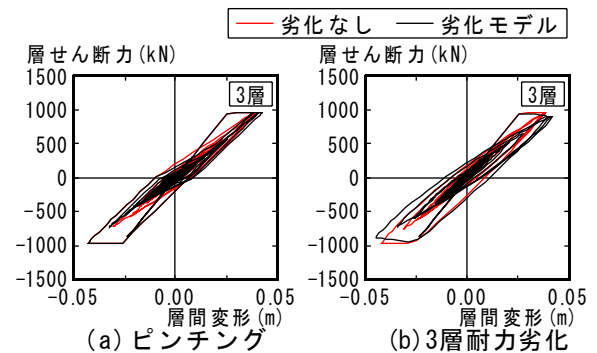


図-9 劣化層の層せん断力-層間変形関係 (ダンパー付加後 $h_d=5\%$)

繰り返し数について、ダンパー付加後の値をダンパー付加前の値を除いたものを地震動のレベル別に示している($\delta_{max}/\delta_{0max}$, ED_r/ED_0 , ND_r/ND_0)。まず最大

応答変形 δ_{max} について見ると、 h_d が大きくなることで、 δ_{max} が大きく低減している。しかし、4層モデル、75cm/s入力、(a) $\gamma_d=0.2$, $h_d=5\%$ (**図**中点線部)のようにダンパー付加により δ_{max} が大きくなる

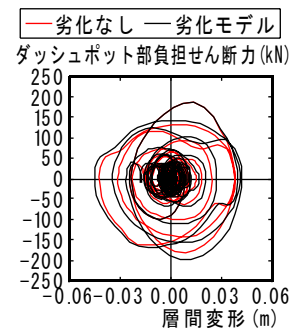


図-10 $Q_{di}-\delta_i$ 関係(3層耐力低下モデル ELCE)

ケースも存在する。これはダンパー付加による ED, ND の変化を検討することで理解できる。ED が小さくなることは当然応答変位低減につながり、ND が大きくなることは同じ入力エネルギー量を ND サイクルに分けて吸収することが出来るため、応答変位低減につながる。4 層モデル、75cm/s 入力、(a) $\gamma_d=0.2, h_d=5\%$ のケースは、ND にほとんど変化が見られず、ED が増加し、かつダンパーの粘性減衰効果が $h_d=5\%$ と比較的小さいため、 δ_{rmax} が大きくなったと考えられる。これと比較して、同じパラメータ (a) $\gamma_d=0.2, h_d=5\%$ の 12 層モデルにおいては、ND に変化が見られないのは 4 層モデルと同様であるが、ED の変動がほぼないため、付加されたダンパーの粘性減衰効果によって δ_{rmax} が低減されている。このように、ED, ND を用いて代表高さの最大応答変形について適切に説明できる。

5.2 弾性応答スペクトルによる ED, ND の推定

5.1 では、代表高さの最大応答変形が ED, ND の値により大きな影響を受けていることを確認した。本項では、粘弾性ダンパーを有する多層 RC 建物の ED, ND の値と、弾性応答スペクトルとの相関性を見る。図-12 は 5, 20% の ED, ND スペクトルと共に、多層 RC 建物における応答値 ED, ND を地震動のレベル別に示している。なお、多層建物の周期には 3 章に示した周期 T_1 を用いている。図-12 より、 $h_d=5\%$ の応答値は 5% の応答スペクトル上に、 $h_d=20\%$ の応答値は $h_d=20\%$ の応答スペクトル上に近い値を示す傾向がある。本論における塑性化の程度 (塑性率 3 以下) であれば、多層 RC 建物の ED, ND の値は h_d の値の等しい 1 質点系の弾性応答から推定できると言える。

6. まとめ

本論では、速度依存型ダンパーとして Voigt モデルを用いた場合の多層 RC 造建物を対象とし、RC 建物の劣化の有無に着目した検討を行い、劣化モデルに対しても速度依存型ダンパーが有効であることを確認した。

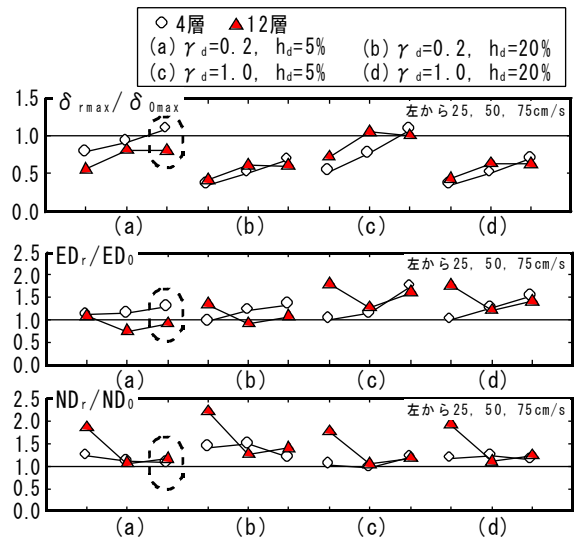


図-11 代表高さ最大応答変形と ED, ND

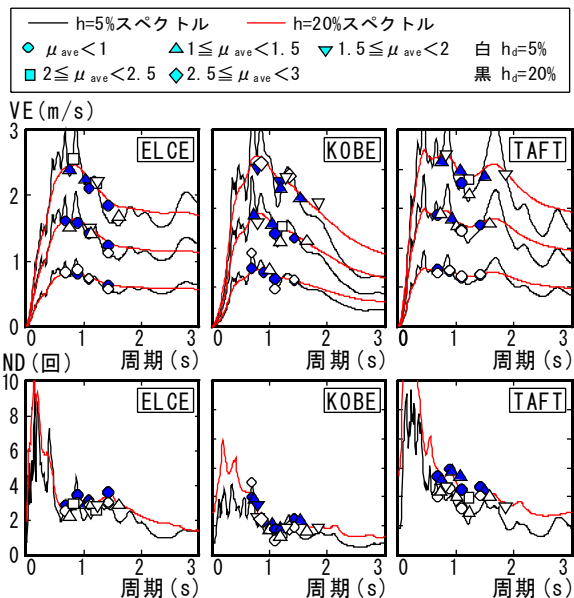


図-12 弾性応答スペクトルと応答値 ED, ND

参考文献：1) 古間直希, 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎：エネルギー釣り合いに基づく純ラーメン RC 建物の制振補強設計手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.13-18, 2003, 2) 織裳慎一郎, 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎：等価 1 質点系モデルを用いた RC 造ピロティ建物の制振補強設計手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1183-1188, 2002, 3) 笠井和彦, 大熊潔：Kelvin 体による粘弾性ダンパー制振構造の簡易時刻歴解析, パッシブ制振構造シンポジウム 2001, pp.257-270, 2001, 4) 石井正人, 北村春幸, 和田章, 笠井和彦：粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 531 号, pp.55-62, 2000, 5) 既存建物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル 2003, 建築研究振興協会, 付録 9-5, 付録 9-17, 6) 丸橋奈々子, 本上忠, 梅村恒, 市之瀬敏勝：層せん断余裕率を用いたエネルギー法による RC 骨組の耐震安全性検証, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.203-208, 2003