

速度依存型ダンパーのエネルギー吸収における加振方向特性について

ENERGY DISSIPATION CHARACTERISTICS OF VELOCITY-DEPENDENT DAMPER BY DIFFERENCE IN DIRECTION OF EXCITATION

鈴木光雄 — * 1

Mitsuo SUZUKI — * 1

キーワード：
 速度依存型ダンパー, エネルギー吸収, 加振方向

Keywords:
 Velocity-dependent damper, Energy dissipation, Direction of excitation

Velocity-dependent dampers have high ability to control responses for not only large but also small vibration. The direction of deformation in these dampers is generally limited to one direction. In the case that direction of damper's axis coincides with direction of excitation, damper dissipates energy most efficiently. However in practice it is relatively rare that the direction of damper's axis coincides with that of excitation. This paper presents that the energy dissipation of velocity-dependent dampers that have nonlinear relationships between velocity and damping force is greatly influenced by difference in excitation.

1. はじめに

建物の耐震性を高めるために、免震構造や制震構造が採用され、エネルギー吸収装置であるダンパーが多用されている。速度依存型のダンパーは、小振動から大振動まで減衰効果を発揮する高い性能を有している。主な速度依存型ダンパーの基本的な機構は、ダンパーが伸縮変形して、内部の高分子材料等の流動抵抗により減衰効果を発揮するものである。

ダンパーの伸縮方向は、ある一方向（以下では、このダンパーの伸縮方向をダンパー軸方向と呼ぶ）に限定されているものが主流となっている。ダンパー軸方向と加振方向が一致する場合、エネルギー吸収効率が最も優れたものとなるが、地震荷重は平面的に任意の方向に発生するため、ダンパー軸方向と外力の加振方向は一般的に一致しない。文献1では方向性を有するダンパーについて、特別な配慮が必要であることが述べられているが、考慮すべき問題点について詳細に言及されていない。また、現在よく使われている速度依存型ダンパーは、速度と減衰力の関係において非線形特性（以下では、単にダンパーの非線形特性と呼ぶ）を有するものが多く、加振方向特性を一般的な形で評価することは容易ではない。本報告では、速度依存型ダンパーのうち、速度と減衰力の関係がバイリニア型と指数乗型となるものを対象（図1）にして、強制変形加振を受けた際のエネルギー吸収の加振方向特性について、数式による表現を試み、これらの結果を参照し、地震動の入力方向による応答性状について確認を行った。

2. ダンパーの基本特性

バイリニア型および、指数乗型ダンパーの速度 $v (> 0)$ と減衰力 F の関係を下式に示す。

$$\bullet \text{バイリニア型: } F(v) = \begin{cases} C_1 v & , v \leq v_1 \\ C_2 v + (C_1 - C_2) v_1 & , v > v_1 \end{cases} \quad (1)$$

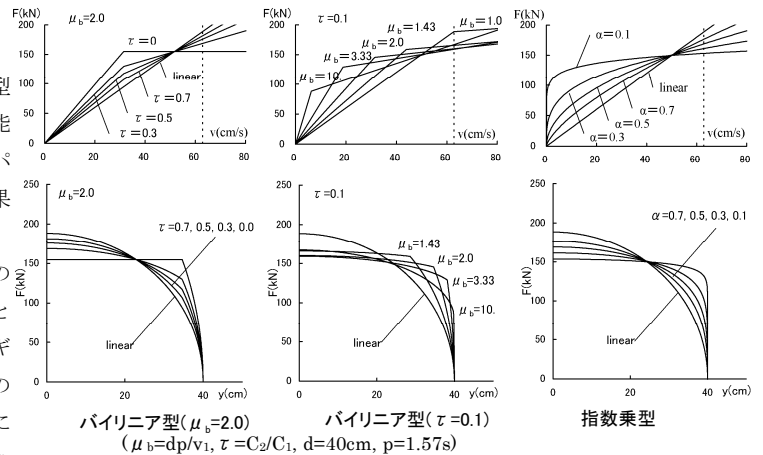


図1 [速度-減衰力](上段)[変位-減衰力](下段)

$$\bullet \text{指数乗型: } F(v) = C v^\alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 F :減衰力、 v :速度、 C_1 :一次減衰係数、 C_2 :二次減衰係数、 C :減衰係数、 α :べき指数値、 v_1 :リリーフ速度

強制変形加振として円振動数 p 、振幅 d の下式の調和変形を与える。

$$y = d \sin(pt) \quad (3)$$

ダンパーの1サイクル当たりのエネルギー吸収量 ΔW をタイプ別に示すと以下ようになる。

$$\bullet \text{バイリニア型: } \Delta W = B(\mu_b, \tau) \pi C_1 d^2 p \quad (4)$$

$$B(\mu_b, \tau) = (1 - \tau) \{ \sin \beta(\mu_b) - \beta(\mu_b) \} / \pi + 1 \quad (4a)$$

$$\beta(\mu_b) = \begin{cases} 2 \cos^{-1}(1/\mu_b) & , \mu_b \geq 1 \\ 0 & , \mu_b < 1 \end{cases}$$

$$\tau = C_2 / C_1, \quad \mu_b = dp / v_1$$

$$\bullet \text{指数乗型: } \Delta W = A(\alpha) \pi C d^{1+\alpha} p^\alpha \quad (5)$$

$$A(\alpha) = 2 / \sqrt{\pi} \cdot \Gamma((\alpha + 2)/2) / \Gamma((\alpha + 3)/2) \quad (5a)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt, \quad (x > 0) : \text{ガンマ関数}$$

本稿は、文献4),5)をもとに加筆修正したものである。

*1 山下設計構造設計部 博士(工学)
 (〒103-8542 東京都中央区日本橋小網町6番1号)

*1 Structural Design Dept., Yamashita Sekkei Inc., Dr. Eng.

バイリニア型の場合、エネルギー吸収特性が初等関数で表され、表計算ソフトなどで簡単に求めることが出来る。一方、指数乗型では、 Γ 関数で表現されるため、数値計算には困難を伴う。このため近似式として下式を提示する(図3)。

$$A(\alpha) = (1 - 4/\pi)\alpha^{0.8} + 4/\pi \dots\dots\dots (6)$$

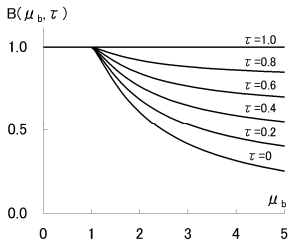


図2 エネルギー吸収係数 $B(\mu_b, \tau)$ (バイリニア型ダンパー)

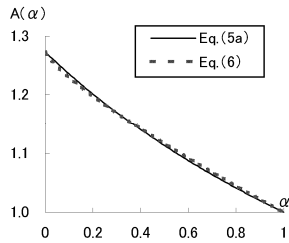


図3 エネルギー吸収係数 $A(\alpha)$ (指数乗型ダンパー)

応答値への影響の観点から、非線形性で着目すべき点として、応答変位の変化によるエネルギー吸収量の変化の割合が上げられる。変位の変動による影響について、以下の考察を行う。 $y = d \sin(pt)$ で調和変形する場合のエネルギーの吸収量 ΔW のダンパーが、振動数 p が同一で、変位 d' で調和変形するときのエネルギー吸収量を $\Delta W'$ とする。エネルギーの吸収量の低下率 $Q_w \equiv \Delta W'/\Delta W$ は、下式のようになる。

$$\cdot \text{バイリニア型: } Q_w = B(\mu_b', \tau) / B(\mu_b, \tau) \cdot (d'/d)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\cdot \text{指数乗型: } Q_w = (d'/d)^{1+\alpha} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\mu_b' \equiv d'p/v_1$ とした。 d'/d を横軸にして Q_w を図4に示す。

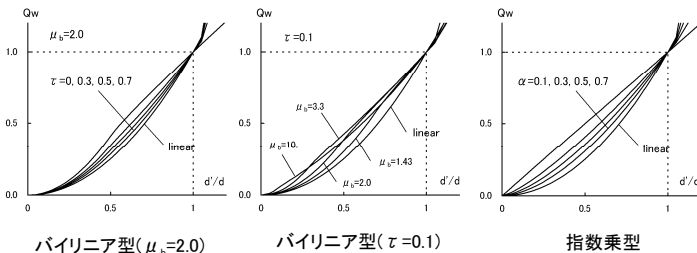


図4 エネルギー吸収率低下率 Q_w

3. ダンパーの角度補正について

ダンパー軸方向と加振方向の角度の差を θ 、加振方向の速度を $v(\equiv dy/dt)$ とすると、ダンパー軸方向の減衰力 F_d および加振方向の減衰力 F_v の関係は次式となる(図5)。

$$F_d(v) = F(v|\cos\theta) \dots\dots\dots (9)$$

$$F_v(v) = F_d(v)|\cos\theta| = F(v|\cos\theta)|\cos\theta| \dots\dots\dots (10)$$

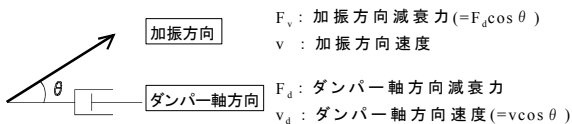


図5 ダンパー軸と加振方向

ダンパー軸方向の加振振幅は $d|\cos\theta|$ に低減され、ダンパーの加振方向特性は、図4に示すような加振振幅の変化に伴うエネルギー吸収量の変化に基づくものとなる。エネルギー吸収量は、(7)、(8)式の d' を $d|\cos\theta|$ に置き換えることにより求められ、角度補正によるエネルギーの吸収量の低下率 Q_w は、下式のようになる。

$$\cdot \text{バイリニア型: } Q_w = B(\mu_b|\cos\theta, \tau) / B(\mu_b, \tau) \cdot \cos^2\theta \dots\dots\dots (11)$$

$$\cdot \text{指数乗型: } Q_w = |\cos\theta|^{1+\alpha} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、加振方向の等価なダンパーについて言及する。一般に地震応答解析では一方自由度の解析が行われており、角度補正の影響を加振方向に配置された等価なダンパーとして表現する必要がある。この場合、(10)式を(1)式、(2)式に適用することにより、各係数を設定すればよい。下式に加振方向の等価なダンパーの係数を $'$ を付けて示す。

$$\cdot \text{バイリニア型: } C_1' = C_1 \cos^2\theta, C_2' = C_2 \cos^2\theta, v_1' = v_1|\cos\theta|, F_1' = F_1|\cos\theta| \quad (13)$$

$$\cdot \text{指数乗型: } C' = C|\cos\theta|^{1+\alpha} \dots\dots\dots (14)$$

また、Maxwellモデルのダンパーの場合、ばね剛性を k とすると、等価なばね剛性は $k' = k \cos^2\theta$ となる。

4. ダンパーの加振方向特性

1) ダンパー系の設定と加振方向特性評価方法

平面的に異なる方向に配置された各ダンパーのエネルギー吸収量を足し合わせた場合の性状を把握するために、以下の①、②のようにダンパー系を設定し、③により、ダンパー系のエネルギー吸収特性における加振方向特性を調べる。

①: ダンパー軸に(3)式の調和変形を受けたときのダンパー系の1サイクル当たりのエネルギー吸収量(以下、ダンパー容量と呼ぶ)を ΔW_0 とする。ここでは、各タイプのダンパーの容量が ΔW_0 となるように、各ダンパーの減衰係数を設定することとなる。図1は例として $a=40(\text{cm})$ 、 $p=1.57(1/\text{s})$ の場合に $\Delta W_0=1.0$ となる各タイプの速度-減衰力関係を示したものである。

②: 平面的に、 n 方向のダンパー軸を等間隔の角度 π/n で設定し、各方向に容量 $\Delta W_0/n$ のダンパーを配置する。

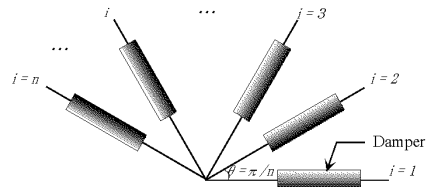


図6 ダンパー系

③: ②で設定したダンパーの系に対して、平面的に任意の方向 θ に(3)式の調和変形を作用する。ダンパー系のエネルギー吸収量(全ダンパーの角度補正を考慮したエネルギー吸収量の合算)を ΔW_s とし、全体のダンパー容量 ΔW_0 と ΔW_s の比を系のダンパー効率として $Q_w \equiv \Delta W_s / \Delta W_0$ で表す。ここで、各方向のダンパーの配置角度を θ_i とすると、各方向のダンパーのエネルギー吸収率の角度補正による低下率は(11)、(12)式の θ を $\theta - \theta_i$ とすることにより求められ、 Q_w は各方向の Q_w の足し合わせとなり、下式の通りとなる。

$$\cdot \text{バイリニア型: } Q_w = 1/n \cdot \sum_i B(\mu_b \cos|\theta - \theta_i|, \tau) / B(\mu_b, \tau) \cdot \cos^2(\theta - \theta_i) \dots\dots (15)$$

$$\cdot \text{指数乗型: } Q_w = 1/n \cdot \sum_i |\cos(\theta - \theta_i)|^{1+\alpha} \dots\dots\dots (16)$$

2) ダンパー系の加振方向特性

指数乗型ダンパーのべき指数値を $\alpha=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ の6タイプとし、バイリニア型ダンパーでは、リリース速度比 μ_b と減衰係数比 τ の組み合わせで以下のように設定する。なお、配置された全ダンパーのリリース速度比 μ_b は、各ケースごとに、変形加振

方向の最大速度 $d \cdot p$ に対して同一の値を与えた。

ケース 1 : $\tau=0.5, \mu_b=1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 10.0$

ケース 2 : $\mu_b=5.0, \tau=0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$

ダンパー軸方向数を $n=1, 2, 3, 4, 6$ の 5 ケースとし、 sQ_w と θ の関係を極座標 (sQ_w, θ) で示すと、図 7、8 のようになる。

$n=1$ からは、各タイプのダンパーの基本的な加振方向依存性を知ることができる。 α, τ が小さいほど、また、 μ_b が大きいほど角度補正によるエネルギー吸収量の低下が小さい。

$n=2$ は、平面的に 90 度の配置角度で設置される一般的な粘性ダンパーの計画に対応する。一般的に用いられている鋼材や鉛などのダンパーは方向性がないものが主流であり、この場合任意の方向で同等のエネルギーを吸収するため、 sQ_w は 1 となる。一方、ダンパー軸方向のみ可動となるダンパーでは、加振方向に対し 90 度に配置されたダンパーのエネルギー吸収量の寄与がないためにダンパー軸方向の効率は 0.5 となる。ただし、非線形特性のダンパーの場合、ダンパー軸方向以外では、0 度、90 度に配置されたダンパーが効率的に寄与して、0.5 以上の値となる。

$n=3, 4, 6$ では、ダンパー軸方向と最大のエネルギー吸収方向が特異な結果となる。 $n=3$ では、ダンパーが配置されている方向が概ね最大となり、 $n=4, 6$ では、逆にダンパー軸方向が概ね最小となる。これは、あるダンパー軸方向と直交の加振方向では、寄与が 0 となるダンパーが存在するためエネルギー吸収量が低下する傾向を示すものとなるためである。ただし、バイリニア型ダンパーで、リリース速度比 μ_b が小さい場合、角度補正によりリリース速度手前の低減衰力の領域が大きくなり、エネルギー吸収量の低下が大きく影響するため、最大、最小の方向は複雑な傾向を示す (図 8 のケース 2)。

$n=2, 3, 4, 6$ からわかるように、非線形特性を有するダンパーでは、ダンパー軸数が多いほど sQ_w の変動幅が小さくなる傾向を示す。配置方向数と最大値、最小値の関係を図 9、10 に示す。 $n \rightarrow \infty$ の場合、指数乗型の場合、 ΔW_s は (17) 式、 sQ_w は (18) 式の通りとなり解析的に得られる。バイリニア型は $n=100$ として数値解析により求めた。

$$\Delta W_s = A(\alpha)\Delta W_{\theta} / 2 \dots \dots \dots (17)$$

$$sQ_w = A(\alpha) / 2 \dots \dots \dots (18)$$

バイリニア型のケース 2 では、上で述べたようにやや複雑な性状を示し、配置方向数に対して、最大値が単調減少とまらない箇所があるが、概ね最大値は減少し、最小値は増加する。また、配置方向数ごとに見れば、 α, τ が小さいほど、また、 μ_b が大きいほど、最大値が大きく、最小値が小さくなる。

構造計画的には系のダンパー効率 sQ_w の最小値を向上させることが主な目標となる。このためにはダンパー軸数を増やし、 α, τ を小さく、また、 μ_b を大きくするほど効果的である。

指数乗型の場合、ダンパー系全体の減衰力の重ね合わせとなるので、(10) 式を参照して速度一減衰力を求めると、下式の通りとなり指数値 α の特性を維持して減衰係数が方向ごとに変わることになる。

$$F = \sum_i^n C |\cos(\theta - \theta_i)|^{1+\alpha} \cdot v^\alpha \dots \dots \dots (19)$$

ダンパーの特性評価は、非線形特性を表すパラメータが指数乗型の場合 α の一つであるのに対し、バイリニア型の場合は、リリース速度 v_1 と二次減衰係数 C_2 (または、 μ_b と τ) の 2 つとなり扱いが煩雑であり、定性的な性状の把握がやや困難である。

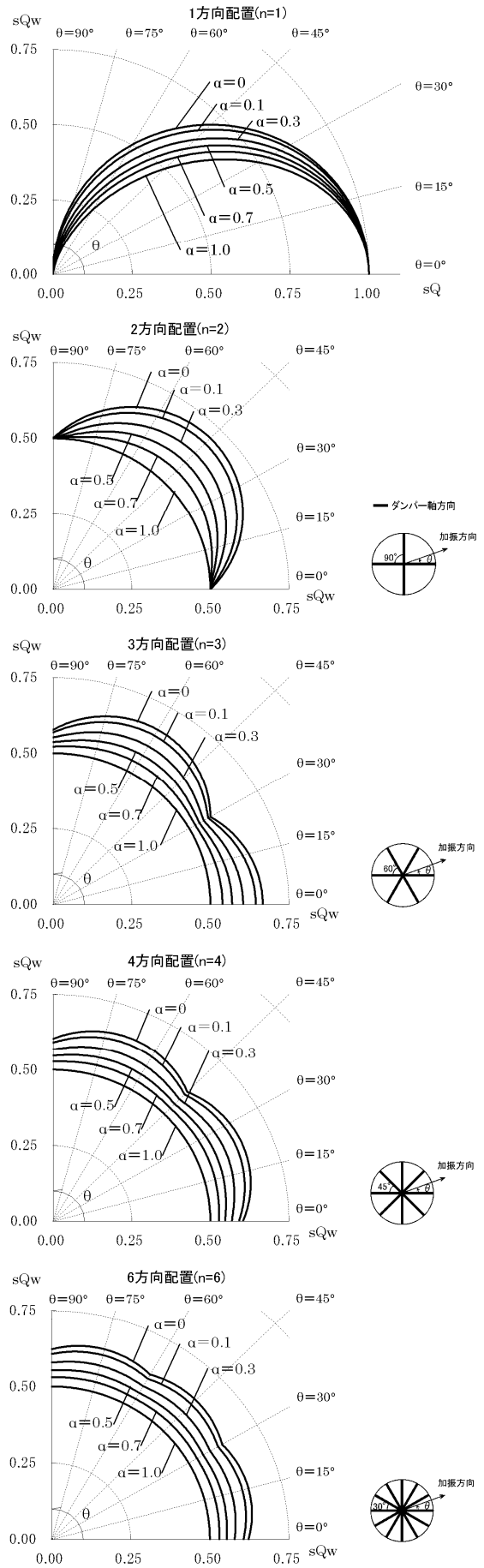
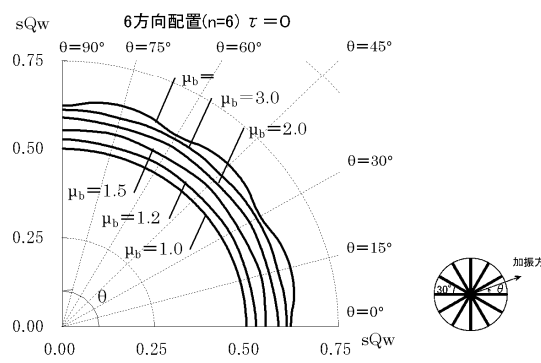
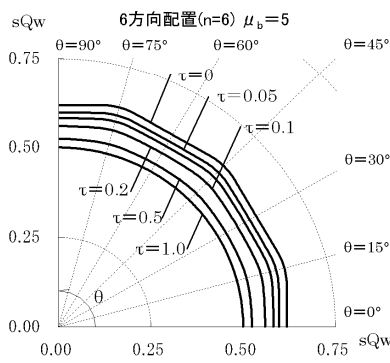
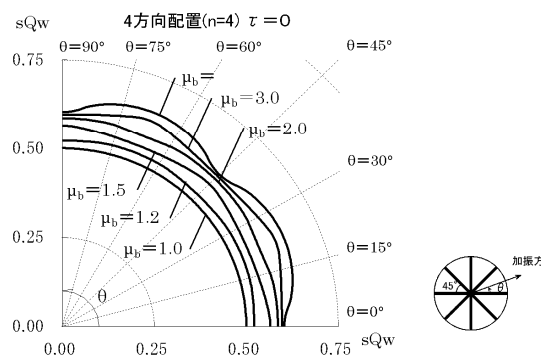
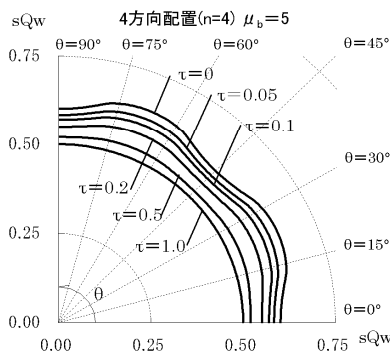
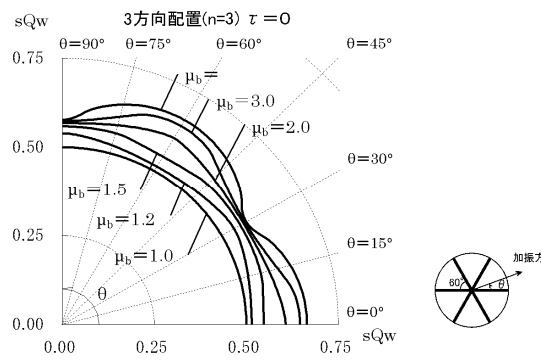
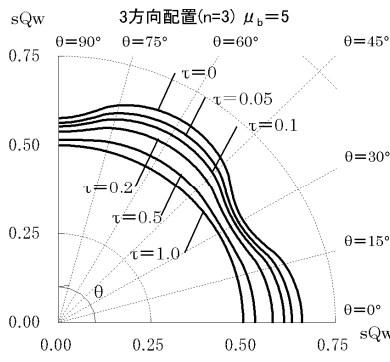
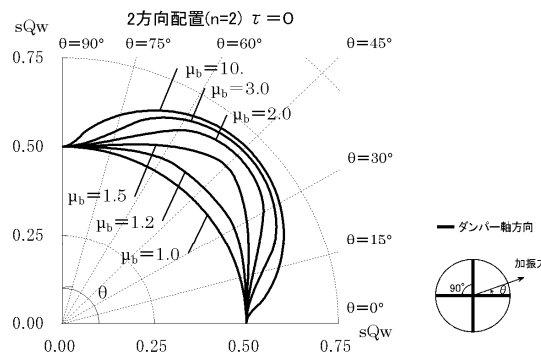
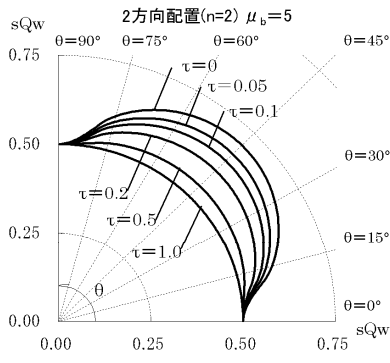
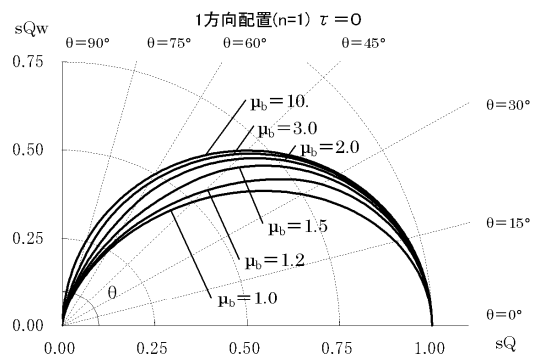
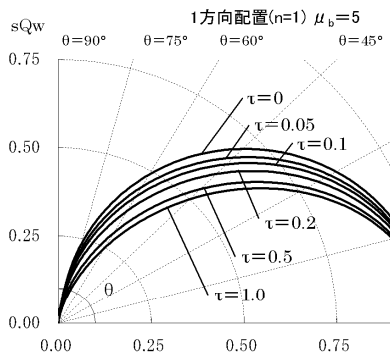


図 7 sQ_w (指数乗型ダンパー)



ケース1 ($\mu_b = 5.0$)

ケース2 ($\tau = 0$)

図8 sQw (バイリニア型ダンパー)

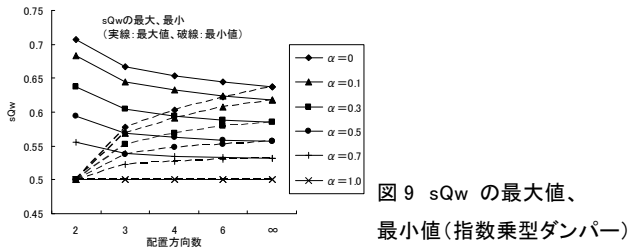


図9 sQw の最大値、最小値(指数乗型ダンパー)

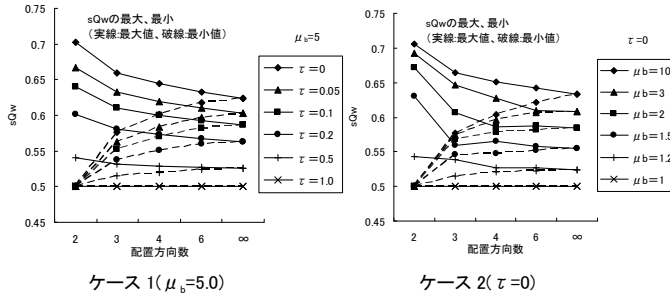


図10 sQw の最大値、最小値(バイリニア型ダンパー)

対応方法として、バイリニア型と等価な指数乗型の指数値を求めて、図7から定性的な傾向を把握する方法も考えられる(付録⁵⁾)。また、文献2、3では、骨格曲線面積一定に基づいた等価な指数乗型の設定方法が示されている。本報告がエネルギー量に基づいているため、図7、8とは直接対応しないが、応答値との関係が詳細に調べられており、応答値との関係を把握するうえで参考となるものと考えられる。

5. 数値解析

上部建物はRCの5階建て事務所を想定して、図11に示すように各階の重量および剛性を設定し、基礎固定の場合の1次固有周期は0.57秒、1次減衰定数は1%の初期剛性比例型とする。免震層は積層ゴムアイソレーターと粘性ダンパーで構成し、免震層上部の総質量 M と免震層の層剛性 k_i に基づく固有周期 $T_f = \sqrt{M/k_i}$ を4秒とする。粘性ダンパーはバイリニア型とし、1台の性能は、一次減衰係数 $C_1=25\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、二次減衰係数 $C_2=1.695\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、リリース速度 $v_1=32\text{cm}/\text{s}$ 、リリース時減衰力 $F_1=800\text{kN}$ とする(図11)。

入力地震動は、エルセントロ NS、タフト EW、八戸 NS の観測波(50cm/s レベル)、告示極稀地震(八戸位相、神戸位相)およびセンター波 Level12 とする。地震動の入力は X 方向から Y 方向に反時計回りに5度ごととし、XY 平面内の2自由度を考慮して解析を行った。免震層および建物の剛性は任意の方向で同一と仮定し、粘性ダンパーの加振方向特性を考慮した。

1) 解析ケース1

図12(a)に示すように X, Y 各方向に6台(計12台)配置した場合の、各方向の免震層の最大変位 d 、建物最上部の応答加速度 a 、ダンパーの吸収エネルギー ΔWd を図13に示す。図14は 0° 、 90° の応答値に対する各方向の応答値の比を示す。なお、非線形ダンパーの場合、地震動の入力方向と建物の最大応答となる方向は一般に一致しない。上記解析では最大変位方向と地震動の入力方向は最大で2.32度、建物最上部の応答加速度では5.48度のずれが生じる。図13、14において(a)、(b)は最大応答値を示す方向にプロットし、(c)は地震動の入力方向にプロットした(解析ケース2の図15、16も同じ)。最大変位の方向は、地震入力方向とずれが生じるが、その差は

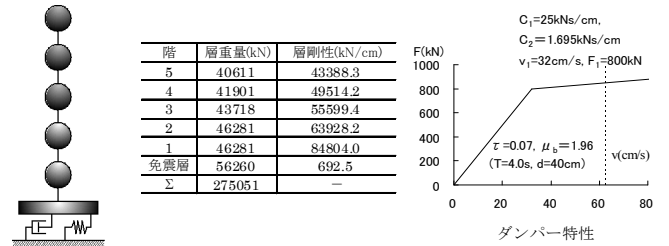


図11 解析モデル

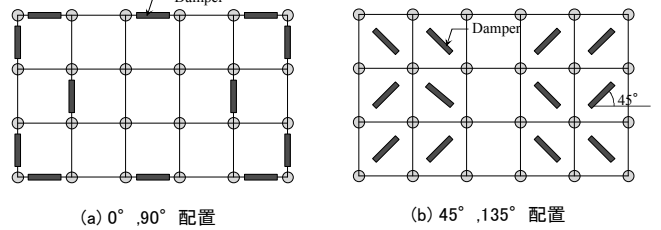
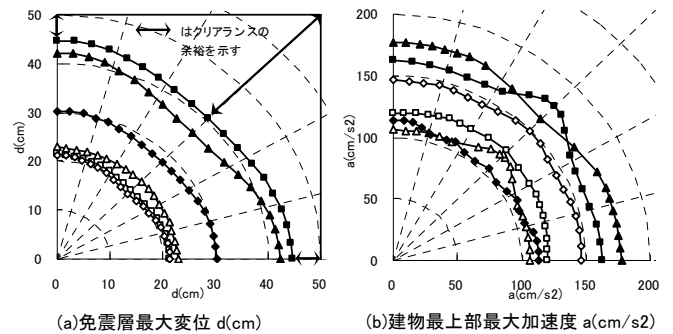


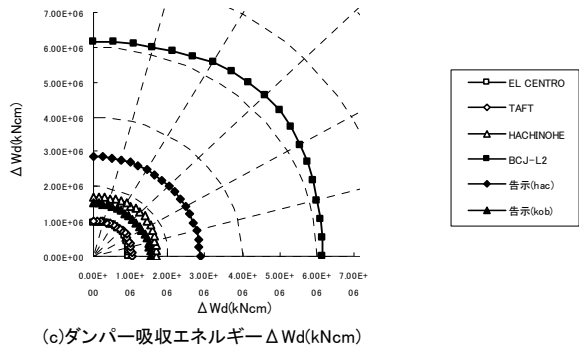
図12 ダンパー配置

比較的小さく、図7、8のエネルギー吸収率の高い方向と、最大応答変位の小さい方向はよく対応している。建物上部の応答加速度では、抵抗力が増すことにより応答が大きくなる地震動もある。図14(c)では、告示極稀地震(神戸位相)のエネルギー吸収量が45度近辺で小さくなっている。これは、時刻歴において最大応答値付近までダンパーのエネルギー吸収量が大きく建物応答が抑えられるが、短時間の地震動で継続して吸収するエネルギー量が少なく、および最大応答値から応答収束までエネルギー消費量が少なくてすむため、最終的に $0, 90$ 度に比べ小さくなった結果である。

長方形の平面形状を有する場合、免震層クリアランスは45度方向では角部分の対角方向になり、許容クリアランスが大きくなる。最大応答の方向角のずれ等、条件ごとに詳細な検討が必要ではあるが、クリアランスの余裕度確保の観点からは、図12(b)のようにダンパーの45度方向配置も有効な計画となるものと考えられる。



(a)免震層最大変位 d(cm) (b)建物最上部最大加速度 a(cm/s²)



(c)ダンパー吸収エネルギー ΔWd (kNcm)

図13 応答解析結果(解析ケース1)

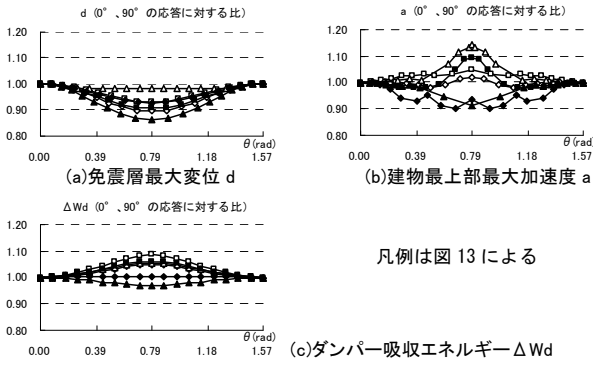


図 14 応答結果の 0°、90° の応答値に対する比

2) 解析ケース 2

次に、ダンパーの配置台数を解析ケース 1 と同じ 12 台で、図 15 のように各方向に 30 度ごとに均等に 6 方向に配置して、応答解析を行った。このときの応答結果を解析ケース 1 と同様に図 16、17 に示す。6 方向配置の場合のダンパーの吸収エネルギーは、図 8 からわかるように、各方向共にほぼ同じものとなるため、各方向の応答結果もほぼ同じものとなる (図 17)。

免震層の最大変位について解析ケース 2 の最大値を解析ケース 1 の最大値で割った値を図 18 に示す。1.0 以下であり、多方向にダンパーの配置した場合の効率性が、応答解析結果からも確認できる。

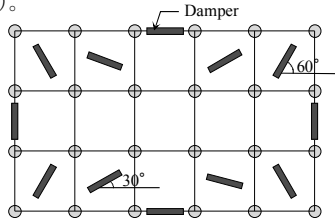


図 15 ダンパー配置(解析ケース 2)

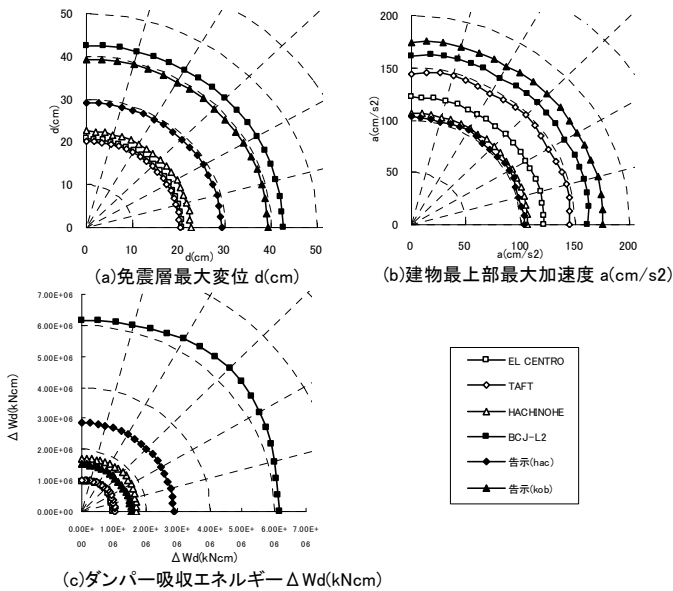


図 16 応答解析結果(解析ケース 2)

2～4 章は強制変形加振による特性検討ではあるが、地震動の入力方向の差異による応答性状の把握にも有用であることがわかる。

6. まとめ

速度と減衰力の関係が非線形となる速度依存型ダンパーについてエネルギー吸収効率の加振方向特性について基本的な考察を行い、以下を確認した。

- 1) ダンパー軸方向と加振方向が異なる場合、角度補正の影響は、 α 、 τ が小さいほど、また、 μ_b が大きいほど小さくなる。

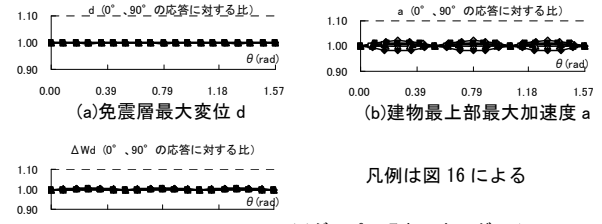


図 17 応答結果の 0°、90° の応答値に対する比

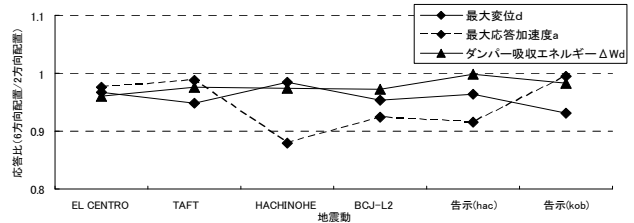


図 18 2 方向配置と 6 方向配置の応答結果比

- 2) ダンパー系のエネルギー吸収効率、 Q_w はダンパーの配置方向数が増えるほど向上し、非線形のパラメータに関しては α 、 τ が小さく、また、 μ_b が大きいほど向上する。
- 3) 上記の考察に基づいて、全体のダンパーの容量を一定にして、免震層の応答変形を制御するダンパーの配置計画の例を、数値解析を通して示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，2001.9
- 2) 小川良典、笠井和彦：バイリニア粘性要素と非線形粘性要素の等価則、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp503-504、2008.9
- 3) 渡邊信也、山崎久雄、高山峯夫、笠井和彦：免震層の応答予測に用いる非線形粘性ダンパーのエネルギー評価—その 1—バイリニア粘性型と非線形粘性型の等価則の確認—、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp235-236、2010.9
- 4) 鈴木光雄：速度依存型ダンパーにおけるエネルギー吸収特性の加力方向依存性、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp531-532、2001.9
- 5) 鈴木光雄：バイリニア型ダンパーと等価な指数乗型ダンパーに関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp559-560、2011.9

付録

バイリニア型ダンパーと等価な指数乗型ダンパーの設定について

調和変形を受けたときのエネルギー吸収量と、最大減衰力が等しくなるように等価な指数乗型ダンパーを設定する方法を示す。まず、バイリニア型ダンパーの表示式の簡便化としてバイリニア型の速度-減衰力式を、(A1)式に示すようなバイリニアの関数を用いて表現すると(A2)式の通りとなる。

$$f_b(\mu, \tau) = \begin{cases} \mu & , \mu \leq 1 \\ 1 + \tau(\mu - 1) & , \mu > 1 \end{cases} \dots (A1)$$

$$F = C_1 v_1 f_b(\mu, \tau) \dots (A2)$$

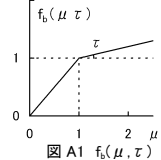


図 A1 $f_b(\mu, \tau)$

調和変形を受けた際のエネルギー吸収量 ΔW と、最大減衰力 F_M と最大変位 d の積との比 U を非線形性の程度を表す指標として下式で表す。

$$\bullet \text{バイリニア型} : U_b = \pi/4 \cdot \mu_b B(\mu_b, \tau) / f_b(\mu_b, \tau) \dots (A3)$$

$$\bullet \text{指数乗型} : U_a = \pi/4 \cdot A(\alpha) \dots (A4)$$

μ_b と τ を与えて、上の 2 式を等置した方程式を満たす α を等価な指数値とする。上式のままでは、 α について陽に解くことが出来ないが、近似式 (6) を用いると下式のように等価な α を陽に表現することが出来る。

$$\alpha = \left(\frac{\mu_b B(\mu_b, \tau) / f_b(\mu_b, \tau) - 4/\pi}{1 - 4/\pi} \right)^{1/0.8} \dots (A5)$$

[2011 年 10 月 20 日原稿受理 2011 年 12 月 28 日採用決定]