

平面配置された粘性ダンパーによる応答方向の特性について

正会員 ○鈴木光雄*

粘性ダンパー 応答方向 調和地動
地震応答解析

1. はじめに

建物の耐震性を高めるために、免震構造が採用され、エネルギー吸収装置であるダンパーが多用されている。このうちの一つである速度依存型の粘性ダンパーは、ある一方向（以下では、ダンパー軸方向と呼ぶ）に伸縮変形が限定され、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性と呼ぶ）を有するものが主流である。非線形特性を有している場合、加振方向によりエネルギー吸収性能に変化が現れる。この際、平面2自由度を考慮すると地震動の入力方向と最大応答を示す方向にずれが生じることも特徴の一つである。本報告では、粘性ダンパーが及ぼす応答の方向特性に関する考察を行う。

2. 強制加振時の直交方向応力

本検討では、非線形特性が(1)式に示すような指数乗型(図1)となるダンパーが、X, Y軸上に90度の角度で2方向に配置された系を検討対象とする(図2)。

$$F = Cv^\alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \dots \dots \dots (1)$$

F: 減衰力, C: 減衰係数, v: 速度 (>0), α : 指数値

初めに、加振方向と直交方向に生じるダンパー反力について調べる。直交座標系 D_1, D_2 に対し、強制加振の調和変形 $D_1 = d_1 \cdot \sin(pt)$ 、 $D_2 = d_2 \cdot \sin(pt + \phi)$ を考える。各変数は、 p : 円振動数、 d_1, d_2 : D_1, D_2 方向の振幅、 ϕ : D_1, D_2 方向の調和変形の位相差、である。

ここで、X軸と D_1 軸のなす角度を θ とする。例として $\alpha=0.3$ のダンパーについて、 θ を30度とし、① $d_2/d_1=0$ (1方向加振) ② $d_2/d_1=0.5, \phi=\pi/2$ ③ $d_2/d_1=0.5, \phi=-\pi/2$ の3ケースについて調べた結果を図3に示す。加振の履歴は $D_1/d_1, D_2/d_1$ と無次元化し、直交方向の反力 F_q は、 $F_q/C/(d_1 p)^\alpha$ とする。実線は加振履歴の軌跡を示し、実線矢印は軌跡上で発生する直交反力ベクトル、点線はベクトルの包絡線を示し、点線矢印は履歴方向を示す。2方向加振の場合、 D_1, D_2 の振動の位相差 ϕ の符号により、直交反力の向きが180度変わる。この反力が、応答のずれ角発生要因となる。なお、線形($\alpha=1.0$)の場合、直交反力は発生しない。

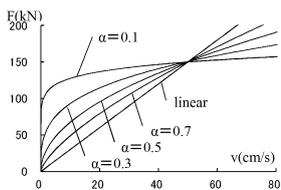


図1 速度-減衰力関係

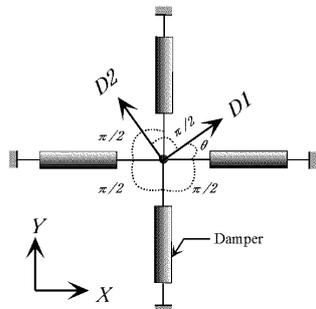


図2 ダンパー配置モデル

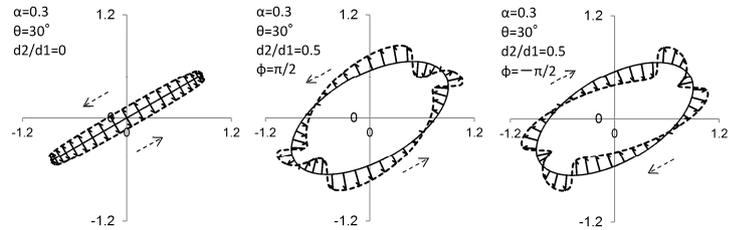


図3 ダンパーの直交方向反力

3. 調和地動時の応答方向の特性

次に調和地動によるXY平面内の2自由度を考慮した定常応答の確認を行う。解析モデルは一質点Mとし、弾性剛性kのばねが90度で交差配置され、非線形ダンパーがX, Y軸に配置されたモデルとする。 $M = 60.0kN \cdot s^2/cm$ 、 $k = 148.0kN/cm$ 、周期 $T = 4.0s$ 、ダンパー以外の減衰0とする。ダンパーの減衰係数は、振幅40(cm)、円振動数 $p = 1.57(1/s)$ の単調強制加振時に、各タイプの吸収エネルギーが等しくなるように表1のように設定した。 D_1, D_2 方向の調和地動は、 $D_1 = d_1 \cdot \sin(pt)$ 、 $D_2 = d_2 \cdot \sin(pt + \phi)$ とし、円振動数 $p = 2\pi/4.0(1/s)$ 、加速度振幅 $d_1 p^2 = 15(cm/s^2)$ 、位相差 $\phi = \pi/2$ とした。

図5の左図は $\alpha=0.3, d_2/d_1=0, \theta=15, 30, 45, 60, 75$ 度のときの定常状態での応答履歴を示す。右図は $\theta=15$ 度の履歴を確認しやすいようにXとYの目盛の縮尺を変えて示した。図3に対応して、ループ状となり楕円の長軸先端ではやや複雑な曲率を示している。

表1 ダンパーの減衰係数

α	C ($kN \cdot (s/cm)^{1/\alpha}$)
0.1	955
0.3	439
0.5	201
0.7	92
1.0	28

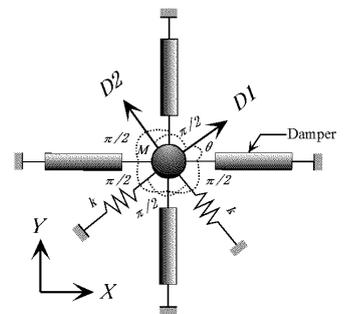


図4 振動解析モデル

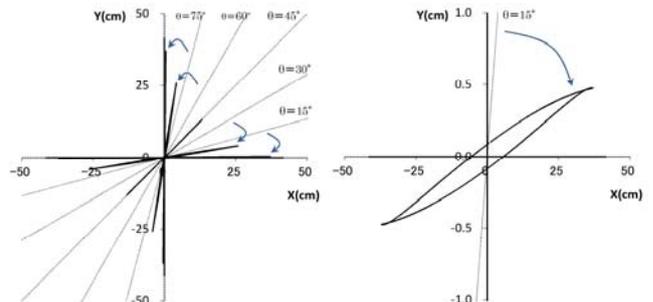


図5 定常応答状態の軌跡 (右は $\theta=15^\circ$ の拡大図)

$\alpha=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ について、 D_1 軸方向 θ を 0 度から 90 度まで 5 度ごとの解析を行い、定常状態で最大変位を示す方向 θ_r を求めた。1 方向入力 $d_2/d_1=0$ の場合について、入力角 θ と応答角 θ_r の関係および、入力角 θ と最大変位の関係を図 6 に示す。45 度を境にして、0 度、90 度方向（ダンパー配置方向）に最大応答の方向がずれているのが確認できる。また、最大変位が異なるので単純比較はできないが、 α が小さいほどずれが大きくなる傾向が示されている。

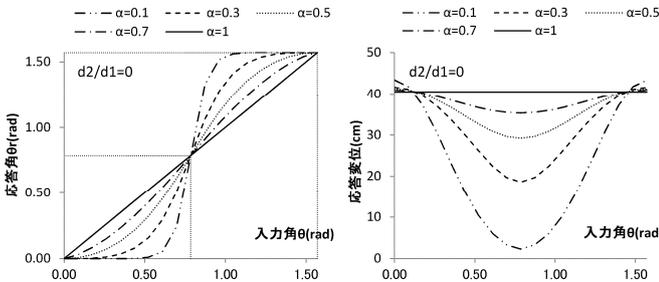


図 6 定常状態の応答角と変位

次に 2 方向入力として、 $\alpha=0.3$ 、 $d_2/d_1=0.33, 0.5, 0.66$ の結果を図 7 に示す。差を確認しやすいように縦軸を、応答のずれ角 $\theta_r - \theta$ とした。また、 ϕ の影響として $\alpha=0.3$ 、 $d_2/d_1=0.5$ で、 $\phi=\pi/2$ と $\phi=-\pi/2$ の比較を図 8 に示す。両者の差は小さいものとなっている。いずれも、1 方向入力に比べるとずれ角は下回っている。

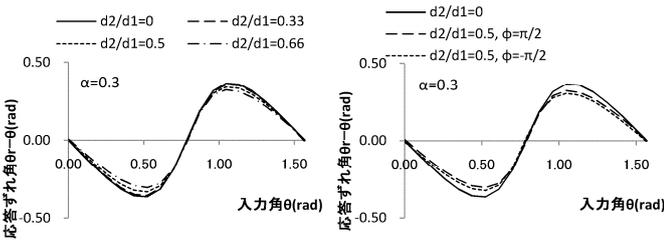


図 7 応答角 (d_2/d_1 の影響)

図 8 応答角 (ϕ の影響)

初期の応答から定常状態に至るまでの履歴を $\alpha=0.3$ 、 $\theta=30$ 度、 $d_2/d_1=0$ と $d_2/d_1=0.5$ の場合について図 9 に示す。状況を確認しやすいように X と Y の目盛の縮尺を変えている。初期で明確に角度のずれがみられ、その後も応答値が増えながら、角度のずれが増加している様子がわかる。

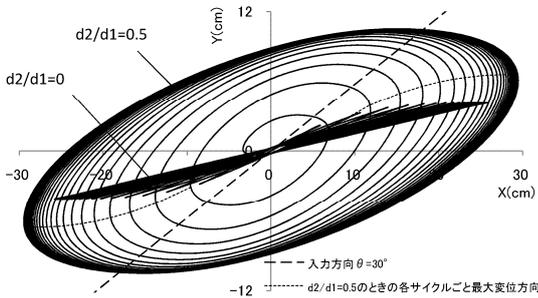


図 9 初期の応答から定常状態に至るまでの履歴

定常状態に至るまで振幅と応答のずれ角が徐々に増加する。定常状態へ至るまでのサイクル数は α が小さいほど多くなり数十回となる。地震時の応答でのサイクルは数回程度と考えられるので、定常状態ほどの応答角のずれは生じないものと推測される。

4. 地震応答解析

3 節で用いた振動解析モデルを対象として、ダンパー $\alpha=0.3$ について、地震応答解析を行う。地震動は D_1 軸に入力し、 θ は X 軸から反時計回りに 5 度ごとの解析とし、XY 平面内 2 自由度を考慮して解析を行った。

入力地震動は、ケース 1 ではエルセントロ 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 Level2 とする。ケース 2 では、エルセントロ、タフト、八戸を D_1 軸に EW 成分、 D_2 軸に NS 成分を入力し、5 度ごとの 2 方向の地震応答解析を行った。なお、エルセントロ EW、タフト NS、八戸 EW は観測記録に対し、エルセントロ NS、タフト EW、八戸 NS の 50cm/s レベルと同じ倍率で設定した。

ケース 1 の結果を図 10 に示す。参考として 3 節で得られた 1 方向加振の定常状態の応答角 θ_r を示す。ずれ角の最大値は、定常状態の場合 20.9 度に対し、11.1 度となっている。1 方向加振の定常状態の曲線に包絡される結果が確認される。

ケース 2 では、調和加振のように地震動の主となる方向が明確ではないため、応答角のずれ角の最大値と最小値の平均値を 0 として、応答角のずれの変動を表す。図 11 は、ずれ角がほぼ 0 となる方向を便宜的に入力角 0 として示したものである。0 度から 180 度までの入力角の変動に対し、45 度ごとに正負が入れ替わり、調和振動で考察された特性が示されている。最大のずれ角は 3.5 度と小さい。

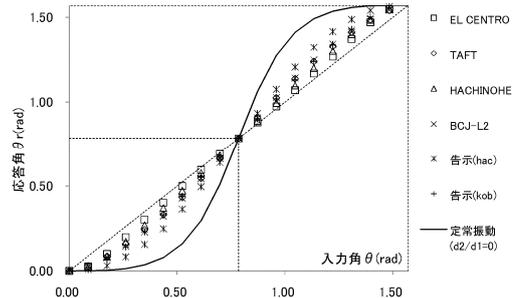


図 10 地震応答解析の入力角と応答角の関係 (1 方向加振)

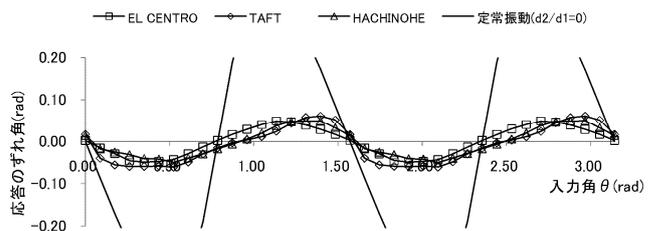


図 11 地震応答解析の入力角と応答角のずれ (2 方向加振)

4. まとめ

平面的に直交に配置された粘性ダンパーの系における応答方向の特性について調べ、概ね 45 度ごとに応答方向のずれの方向が入れ替わることを、調和地動解析、地震応答解析により確認した。本報告で調べた範囲では、二方向加振および地震動解析の結果得られた、応答角のずれは、一方向加振の定常状態のずれ角に包絡されている。

参考文献

- 1) 鈴木光雄：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、日本建築学会技術報告集 18(39), 459-464, 2012-06