

幾何学的非線形性を考慮した粘性ダンパーの加振方向特性について

正会員 ○鈴木光雄*

粘性ダンパー 幾何学的非線形性 エネルギー吸収
調和振動

1. はじめに

免震構造は、免震層の剛性を低下させることにより長周期化を図り、上部構造への入力地震動を低減させる。剛性低下により免震層では大きな変形が生じるため、積層ゴムアイソレーターやダンパーは大変形に追従できる性能が求められる。粘性ダンパーの主なものは、ダンパーの変形が一方（以下、ダンパー軸方向）に限定され、ダンパー軸方向と異なる方向の地震力に対しては、ダンパー両端の支持部分をピン接合とし、自由に回転することにより大変形に追従する。本報告では、大変形が生じ、ダンパーが変形追従する際に、ダンパーの減衰性能にどのような影響が生じるか、基本的な考察を行う。

2. 幾何学的非線形性を考慮した強制加振

本報告で対象とするダンパーの速度 $v(>0)$ と減衰力 F の関係は線形とし、一台当たりの減衰係数を C とする。

$$F(v) = Cv \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1に示すような初期状態（長さ L_0 、加振方向とダンパー軸の角度差 θ_0 ）のダンパーに、強制変形加振として円振動数 p 、振幅 d の調和変形 $y = d \sin(pt)$ を与える。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 $v (= dy/dt)$ 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。

$$F_d(v) = F(v|\cos\theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_v(v) = F_d(v)|\cos\theta| = F(v|\cos\theta)|\cos\theta| \quad \dots\dots\dots (3)$$

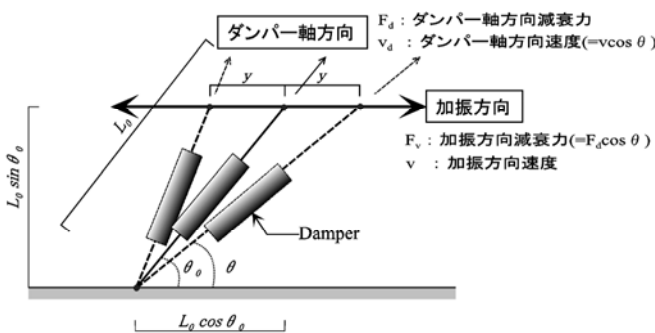


図1 加振方向とダンパー軸方向

ここで、加振方向とダンパー軸方向のなす角度が時々刻々変化する幾何学的非線形の影響を考慮すると、 $\cos\theta$ は変位 y の関数となり下式で表される。

$$\cos\theta = (\cos\theta_0 + y/L_0) / \sqrt{1 + 2\cos\theta_0 \cdot y/L_0 + (y/L_0)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

幾何学的な非線形性を考慮しない場合は、 $L_0 \rightarrow \infty$ ($y/L_0 \rightarrow 0$) に対応し、 $\theta = \theta_0$ （一定値）となる。

図1のダンパーのエネルギー吸収量 ΔW について、 $\theta_0 = 0$ のときのエネルギー吸収量 ΔW_0 を基準として、角度 θ_0 と $\Delta W/\Delta W_0$ 関係を示す。図2は、 θ_0 が 15、30、45、60、75、90 度のときの「変形—減衰力（加振方向）」の関係を、横軸を y/d 、縦軸を $F_v/(Cvd)$ で基準化して示す。

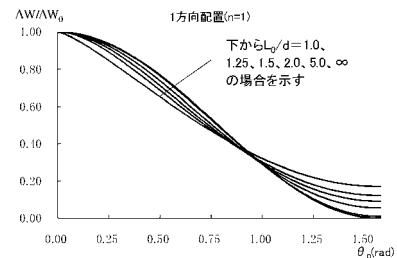


図2 加振方向とエネルギー吸収量

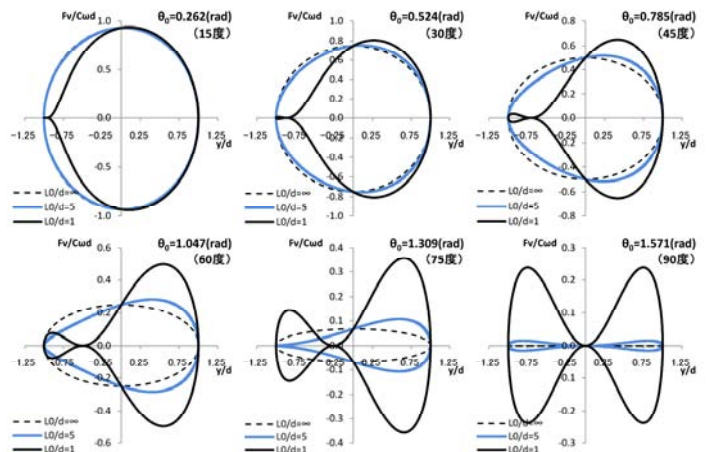


図3 変形—減衰力（加振方向）の関係

図2から、幾何学的非線形性を考慮すると、考慮しない場合 ($L_0/d = \infty$) に比べ、 θ_0 が $0 \sim 0.9$ (rad) 程度までエネルギー吸収量が低下し、 0.9 (rad) 程度を超えると逆に増加することがわかる。図3からは、 θ_0 が大きくなると、履歴ループの形状が非線形性の影響を強く受けることがわかる。また、図2では $L_0/d = 5$ と ∞ の差異は、すべての θ_0 の範囲で極めて小さいものとなっているが、図3では、60度、75度の変形—減衰力の履歴は、差異が比較的明瞭となっている。

次に、90度の角度を持って2方向に配置された場合について、同様な検討を行う（図4）。図5に加振方向とエネルギー吸収量の関係を示し、図6に、 θ_0 が 0、30、45 度のときの「変形—減衰力（加振方向）」の関係を示す。

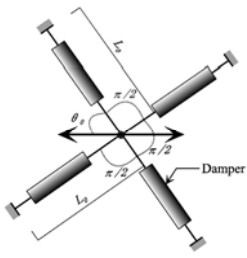


図4 2方向配置モデル

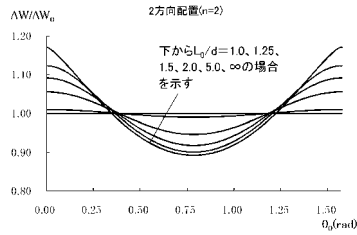


図5 加振方向とエネルギー吸収量
(2方向配置モデル)

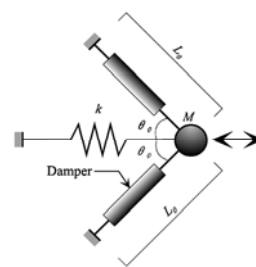


図7 モデル1

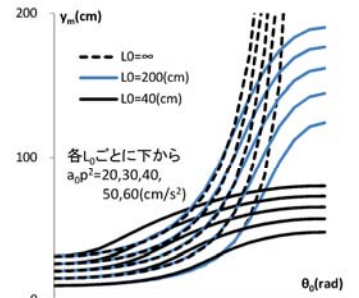


図8 最大応答振幅 (モデル1)

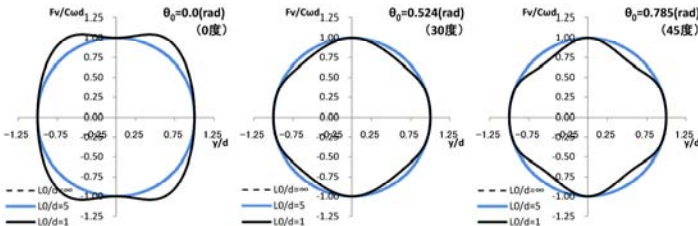


図6 変形—減衰力の関係 (2方向配置モデル)

図5から、 θ_0 が $0.3 \sim 1.2$ (rad) 程度の範囲ではエネルギー吸収量が低下し、その他の範囲では増加することがわかる。図6から、2方向に配置することにより、 $L_0/d = \infty$ と $L_0/d = 5$ との差は小さくなり、非線形性の影響は低減されることがわかる。

3. 調和地動に対する応答

次に、円振動数 $p = 2\pi/4.0(1/s)$ 、振幅 a_0 の調和地動 $y = a_0 \sin(pt)$ を与えた場合の定常応答を確認する。検討対象は、固有周期4.0秒の一質点モデル(質量 M 、ばね定数 k 、構造減衰0)に粘性ダンパーが配置されたモデルとする。

モデル1(図7)は、1方向配置の応答確認を目的として、地動方向軸に対称に2台のダンパーを配置したもので、ダンパー軸方向の角度を θ_0 とする。それぞれのダンパーの減衰係数は、 $C = 2 \times 0.2 \times \sqrt{kM}$ と設定した。調和地動の加速度振幅は $a_0 p^2 = 20, 30, 40, 50, 60 (cm/s^2)$ の5ケースとし、ダンパーの長さは $L_0 = \infty, 200, 40 (cm)$ の3タイプについて確認した。定常状態について、図8に最大応答振幅 y_m を示し、図9に θ_0 が30、45、90度の際の「変位—速度」、「変位—減衰力(地動方向)」の履歴ループを示す。非線形の場合、正、負の振幅は対称にならず、正方向、負方向の速度も異なるものとなる。

モデル2(図10)は、2方向に配置されたダンパーのモデルで、ダンパーの減衰係数は、 $C = 2 \times 0.1 \times \sqrt{kM}$ と設定した。応答結果を図11、12に示す。図11では、強制加振のエネルギー吸収量の特性から推察されるとおり、 θ_0 が0、90度付近で応答変位が小さく、45度付近で大きくなっていることが確認できる。また、モデル1、2の45度加振では、 $L_0 = \infty$ のダンパーの減衰力は共に等しくなるが、履歴ループには大きな違いが見られる。モデル2のように対称配置とすることにより、幾何学的な非線形の影響を低減できることがわかる。

4. まとめ

粘性ダンパーの変形追従による幾何学的な非線形性の影響について、強制加振、調和地動の応答に基づき、基本的な考察を行った。

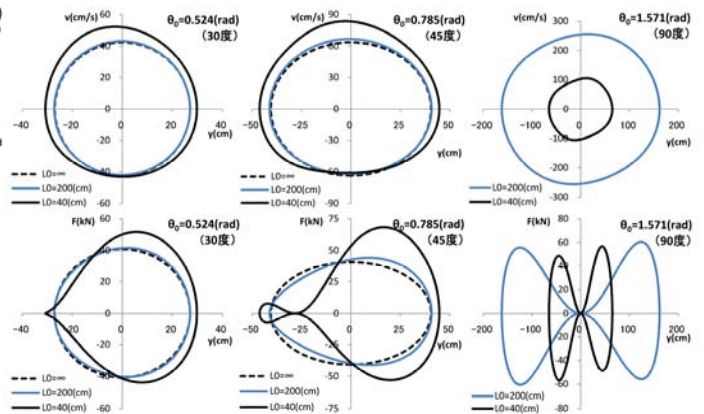


図9 「変位—速度」(上段)、「変位—減衰力(地動方向)」(下段)
(モデル1)

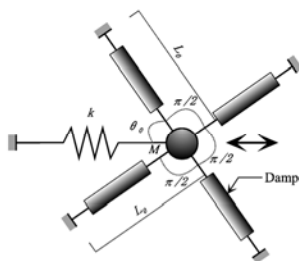


図10 モデル2

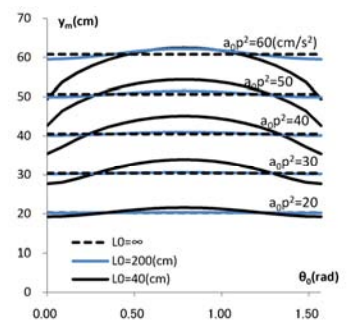


図11 最大応答振幅 (モデル2)

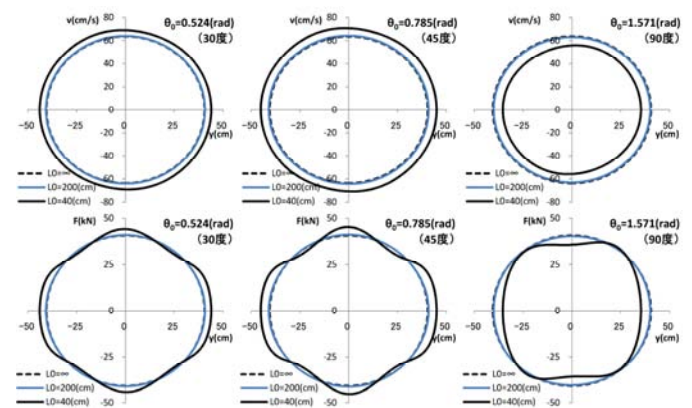


図12 「変位—速度」(上段)、「変位—減衰力(地動方向)」(下段)
(モデル2)