

I - 627 道路橋制振用ダンパー装置の開発及びその性能についての基礎的研究

(株)大林組技術研究所 ○正員 孫 利民

(株)大林組技術研究所 正員 後藤洋三

1 はじめに 高橋脚道路橋、免震橋などの固有周期の長い橋では、地震時の桁の変位を付加制振装置の装着により抑えることが望ましい。そのため、著者ら[1]は減衰係数可変のバリアブルダンパー（図-1）を提案し、その制振効果を理論解析によって検討した。文献[1]の解析では、地震時のダンパーは臨界減衰に近い高減衰状態になっている場合がよくあった。その場合、実際のオイルダンパー装置では油の圧縮と管路などの膨らみによりバネ特性を持つことが予想される。しかし、解析に用いたダンパーのモデルが単純なダッシュ・ポットであったため、そのようなバネ効果の影響は全く反映されない。本研究では、実橋用規模のダンパーを想定し、バネ要素を含めたダンパーをモデリングしてダンパーの基本特性及びそれによる橋の制御効果への影響を理論解析によって検討する。

2 解析用モデル橋 左右対称の高橋脚PC道路橋（図-1）の半分を解析対象として選定した。固有値解析[2]による橋の構造特性を求めた。本研究では、橋の1次モードに注目し、橋を1自由度系にモデル化した（図-2）。

3 ダンパーのモデリング及び特性 文献[1]の解析結果によりダンパー最大水平反力を500(tonf)に設定した。それを4つのダンパーにより分担すると、1基の最大反力は125(tonf)になる。同規模のダンパーの資料[3]を参考にし、想定した実橋用ダンパーのピストンとロッドの寸法を決めた（図-3）。ダンパーのストロークは±50(cm)である。油の体積弾性係数 $k=17(\text{tonf/cm}^2)$ 。文献[1]のバリアブルダンパーの制御アルゴリズムでは、橋の変位を最大限に抑えるため、バリアブルダンパーの減衰が常時は臨界減衰に設定されている。地震の時に、ダンパー減衰が外力と橋の応答の状況に応じて変動し、必要な場合にはダンパーの減衰を下げ、過大なダンパー反力を避けて橋とダンパーを保護するようになっている。本研究では、ダンパーのバネ効果の影響が最も大きい場合について検討するため、ダンパーの減衰係数 C_0 は構造系全体の減衰（構造減衰+ダンパーの減衰）が臨界減衰になるときの値を用いた。 $C_0=71,850(\text{ton/sec})$ 、ここで、 C_0 は振動数 $\rightarrow 0$ で加振するときのダンパーの減衰係数を表す。ダンパー装置の管路の膨らみによるバネ効果を無視し、油の圧縮によるバネ効果のみを考慮してダンパーのバネ定数を次のように計算した。

$$\begin{aligned}
 K &= \text{ダンパー個数} \times \frac{\text{受圧面積} \times \text{油の弾性係数}}{\text{片ストローク}} \\
 &= 4 \times \frac{(\pi \times 15^2 - \pi \times 5^2) \times 17}{50} = 854.4(\text{tonf/cm})
 \end{aligned} \quad (1)$$

ダンパーはマックスウェルモデル[4]にモデル化した。ダンパーの反力 F とピストンの速度 $\dot{X}$ の関係は式(2)で表す。

$$F + \lambda \dot{F} = C_0 \dot{X} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda = C_0/K = 0.086(\text{sec})$ 。実装置の場合は λ の値が実験により決められる。式(2)をフーリエ変換すると、

$$\bar{F}(\omega) = [K_d(\omega) + i\omega C_d(\omega)] \bar{X}(\omega) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{F}(\omega)$ 、 $\bar{X}(\omega)$ はダンパーの反力とピストンの変位の振幅であり、 $K_d(\omega)$ 、 $C_d(\omega)$ は加振振動数 ω に依存するダンパーのバネ係数と減衰係数であり、

$$\begin{aligned}
 K_d(\omega) &= \frac{C_0 \lambda \omega^2}{1 + \lambda^2 \omega^2} \\
 C_d(\omega) &= \frac{C_0}{1 + \lambda^2 \omega^2}
 \end{aligned} \quad (4)$$

で表す。本研究で用いた例の $K_d(\omega)$ 、 $C_d(\omega)$ と ω の関係を図-4 にプロットした。

4 理論解析と考察 図-2 に示す1自由度系にダンパーを装着後の運動方程式は次のようになる。

$$M_s \ddot{X} + C_s \dot{X} + K_s X + F = P \quad (5)$$

ダンパーの減衰力は式(2)で表す。地震入力の場合は $P = -M_s \ddot{X}_g$ 、ここで、 $\ddot{X}_g$ は地表面加速度である。式(5)で表され

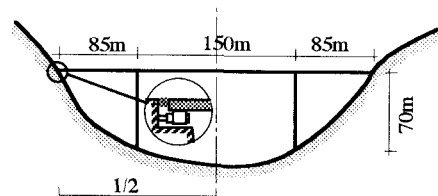


図-1 ダンパーによる高橋脚PC道路橋の制振

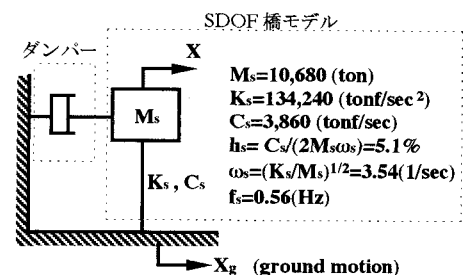


図-2 1自由度化したモデル橋

る系の伝達関数は次のようになる、

$$\bar{H}(\omega) = \frac{1}{K_s} \left[1 + i2h_s\beta - \beta^2 + \frac{i2h_d\beta + 2h_d\beta^2\nu}{1 + \beta^2\nu^2} \right]^{-1} \quad (6)$$

ここで、 $h_d = C_o / (2\sqrt{M_s K_s})$ 、 $\beta = \omega / \omega_s$ 、 $\omega_s = \sqrt{K_s / M_s}$ 、 $\nu = \lambda \omega_s$ 。外力をフーリエ変換すると、

$$\bar{P}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

橋の応答は次の式で求められる。

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{H}(\omega) \cdot \bar{P}(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (8)$$

本研究では、最大加速度300(gal)のEl Centro NS(1940)地震波を用いて橋の応答をDFT法[5]で計算した（図-5）。ダンパーがない場合（図-5a）、橋の最大応答変位は4.1(cm)で、最大加速度は118(gal)である。ダンパーを装着後、ダンパーのバネ効果を考慮しない場合は（図-5b）、最大応答変位が約1/4の1.0(cm)までに減少するが、最大応答加速度は多少小さくなり、約110(gal)である。ダンパーは橋の変位を抑えることに効果的であることが分かる。しかし、ダンパーのバネ効果を考慮した計算結果を見ると（図-5c）、最大応答変位は1.2(cm)、最大加速度は136(gal)と大きくなっている。ダンパーのバネ効果を考慮しない場合には、ダンパーの制振効果が過大評価されることが分かった。また、ダンパーの反力についてもバネ効果を考慮した場合の計算結果（610(tonf)）が考慮しない場合（579(tonf)）より大きくなっている。

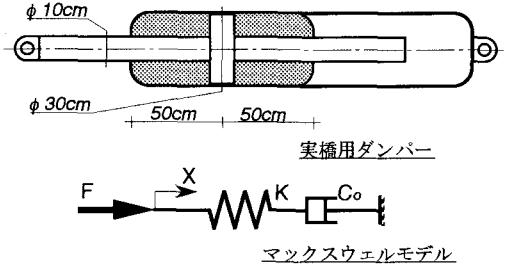


図-3 実橋用ダンパー及びマックスウェルモデル

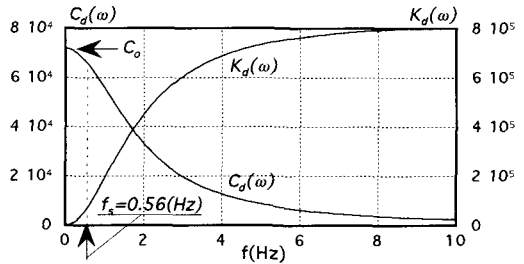
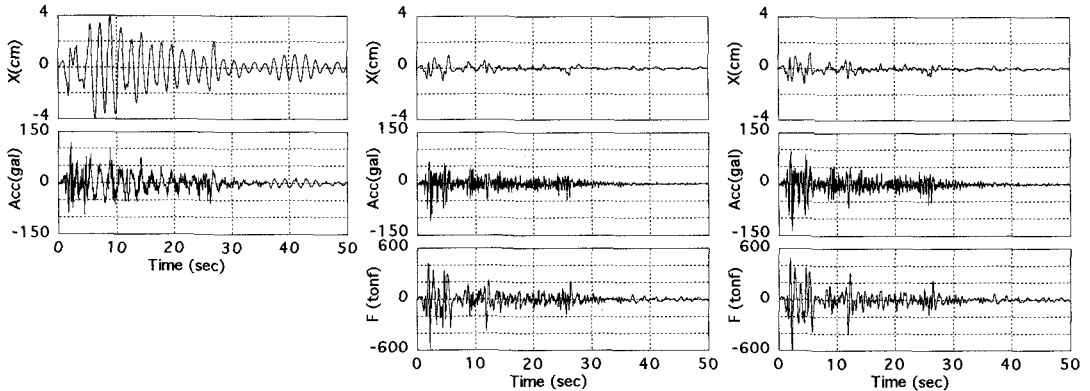


図-4 加振振動数に依存するダンパー特性



(a) ダンパーなし($\lambda=0$, $C_o=0$) (b) ダンパー有り；バネ効果を考慮しない($\lambda=0$, $C_o=71,850$ ton/sec) (c) ダンパー有り；バネ効果を考慮する($\lambda=0.086$ sec, $C_o=71,850$ ton/sec)

図-5 モデル橋の地震応答

5 まとめ 橋梁制振用の粘性ダンパーをバネ効果を考慮してモデル化した。ダンパーの特性は加振振動数に依存する。振動数が高くなるに連れ、ダンパーのバネ係数が増大し、減衰係数が逆に減小する。ダンパーのバネ効果を考慮しない場合、ダンパーの制振効果が過大評価され、応答加速度とダンパー反力が過小評価される傾向がある。従って、高減衰係数を用いたパッシブ或いはバリアブルダンパーをモデル化する場合、ダンパーのバネ効果を考慮する必要がある。本研究では橋の振動数の一番低い1次モードについて検討したが、図-4に示すように高い振動数を持つ高次モードに対するダンパーのバネ効果の影響が大きくなると予想できる。今後、これについても検討する予定である。

参考文献 [1] 孫、後藤：48回土木年次大会，p674-675，1994。[2] 孫、後藤：9回地震工シンポ，pp6，1994。[3] Taylor Devices社技術資料，1993。[4] Makris, N. : ASCE/SE, 117(9), p2708-2724, 1991。[5] Veletsos, A. : ASCE/SE, 111(12), p2625-2642, 1985。