

構造物の揺れ振動に及ぼす TLD の影響

九州工業大学工学部 正員 高西 照彦
 大分工業高等専門学校 正員 園田 敏矢
 九州工業大学工学部 正員 多田 浩

1. まえがき

近年、超高層ビルやタワー等が数多く建設されているが、それらが強い地震や風を受けると大きな揺れを生じる。この揺れを軽減する目的で当該構造物に液体の動揺振動を利用した同調液体ダンパー (TLD) が設置されることがある。TLD はその内容液の動揺振動の固有周期を構造物のそれに同調させることによって制振効果を発揮する装置であるから、構造物が並進振動をしているような場合についてはその制振効果を期待できるが、重心と剛心とが一致せず、構造物に揺れ振動が生ずるような場合には一般に並進と揺れ振動とが生じ両者の固有周期が異なるので、TLD の制振効果が期待できず、場合によってはそれは揺れ振動を助長するように働くことが有り得ることも考えられる。本論は上記の問題点を簡単な振動モデルを用いた数値解析によって解明することを目的としている。

2. 構造物 - TLD 系の振動解析理論

簡単のため、構造物を図-1(a) に示すように水平 2 方向と回転の 1 質点 3 自由度を有する振動系にモデル化した場合について考える。同図中 O は重心、S は剛心の位置を表す。この構造物に図-1(b) に示すように TLD (T_i) を設置する。図-1 の構造物 - TLD 系が x, y 方向に $\ddot{\varphi}_x(t), \ddot{\varphi}_y(t)$ の地震加加速度を受けたときの振動方程式は次式のように表される。

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = -m\ddot{\varphi}_x + c_x e_y \dot{\theta} + k_x e_y \theta + c_{\xi i} \dot{\xi}_i + k_{\xi i} \xi_i \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m\ddot{\varphi}_y - c_y e_x \dot{\theta} - k_y e_x \theta + c_{\eta i} \dot{\eta}_i + k_{\eta i} \eta_i \quad (2)$$

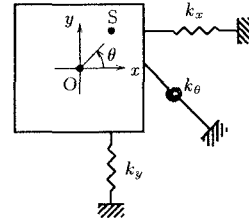
$$J_\theta \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + k_\theta \theta = c_x e_y \dot{x} + k_x e_y x - c_y e_x \dot{y} - k_y e_x y$$

$$-(c_x e_y^2 + c_y e_x^2) \dot{\theta} - (k_x e_y^2 + k_y e_x^2) \theta - c_{\xi i} y_i \dot{\xi}_i - k_{\xi i} y_i \xi_i + c_{\eta i} x_i \dot{\eta}_i + k_{\eta i} x_i \eta_i + c_{\phi i} \dot{\phi}_i + k_{\phi i} \phi_i = 0 \quad (3)$$

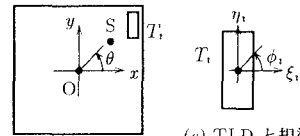
$$m_{\xi i} \ddot{\xi}_i + c_{\xi i} \dot{\xi}_i + k_{\xi i} \xi_i = -m_{\xi i} \ddot{\varphi}_x - m_{\xi i} \ddot{x} + m_{\xi i} y_i \ddot{\theta} \quad (4)$$

$$m_{\eta i} \ddot{\eta}_i + c_{\eta i} \dot{\eta}_i + k_{\eta i} \eta_i = -m_{\eta i} \ddot{\varphi}_y - m_{\eta i} \ddot{y} - m_{\eta i} x_i \ddot{\theta} \quad (5)$$

$$J_{\phi i} \ddot{\phi}_i + c_{\phi i} \dot{\phi}_i + k_{\phi i} \phi_i = -J_{\phi i} \ddot{\theta} \quad (6)$$



(a) 構造物の振動モデル (平面図)



(b) TLD を設置した構造物の振動モデル

(c) TLD と規準座標

図 1: 構造物 - TLD 系の振動モデル

上式で式 (1)~(3) は構造物の、式 (4)~(6) は TLD (T_i) の振動方程式である。また、 m, J_θ は構造物の質量、慣性モーメント、 $c_x, k_x, c_y, k_y, c_\theta, k_\theta$ は構造物の x, y, θ 方向の減衰係数、バネ定数であり、 $m_{\xi i}, c_{\xi i}, k_{\xi i}, m_{\eta i}, c_{\eta i}, k_{\eta i}, J_{\phi i}, c_{\phi i}, k_{\phi i}$ は TLD (T_i) を等価振動系で表したときの ξ_i, η_i, ϕ_i 方向の等価質量、等価減衰係数、等価バネ定数である。TLD を N 個設置した場合には式 (1)~(3) では $i=1 \sim N$ の総和を取り、式 (4)~(6) では $i=1 \sim N$ とすればよい。 $\ddot{\varphi}_x(t)$ 及び $\ddot{\varphi}_y(t)$ が与えられれば、式 (1)~(6) から図-1 に示す構造物 - TLD 系の時刻歴応答を求めることができる。また、 $\ddot{\varphi}_x(t) = \ddot{\varphi}_y(t) = 0$ 及びすべての減衰係数を 0 とすれば、構造物 - TLD 系の固有振動数と振動モードを求めることができる。

3. 数値計算結果及び考察

計算対象としては 47 階の超高層ビルを選び、これを図-1(a) のように 3 自由度系にモデル化した。モデルの大きさは図-2 に示す通りである。このとき

$$m = 0.10967 \times 10^7 \text{ kg}, J = 0.64667 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ k_x = 0.45052 \times 10^7 \text{ N/m}, k_y = 0.23415 \times 10^7 \text{ N/m}, \\ k_\theta = 0.23443 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m} \text{ であり、減衰定数は } h_x = 1.8$$

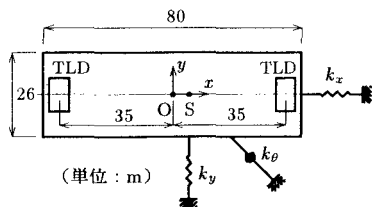


図 2: 超高層ビル (47 階) の振動モデル

%, $h_y=0.5\%$, $h_\theta=1.1\%$ とした。また、 N 個の TLD の等価質量と構造物の質量比 μ は 0.01 とした。このときの TLD と構造物の最適固有振動数比 γ と最適減衰定数 h は次式によって与えられる。

$$\gamma = \frac{1}{1+\mu} = 0.990, \quad h = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} = 0.06 \quad (7)$$

TLD の大きさは上記の条件を満足するように長さ 1.244 m、幅 1.729 m、水深 6.5 cm とし、個数は $N=98$ 個とした。減衰定数は $h_{\xi i}=h_{\eta i}=h_{\phi i}=0.06$ とした。TLD の等価質量と等価バネ定数は著者らの示した式¹⁾を用いて算出した。図-2 のモデルを用いて算出した構造物-TLD 系の主要な固有振動数と振動モードの一例を図-3 に示す。なお、図-3 は図-2 に示すように剛心の座標を $e_x=5$ m, $e_y=0$ とし、TLD は x 軸上重心に対称に $N/2$ 個ずつ設置した場合について得た結果である。1 次は TLD の η_i 方向の変位が、3 次は構造物の y 方向変位が、5 次は構造物の θ 方向の回転が卓越するモードである。次に式 (1)~(6) において $\ddot{\varphi}_x(t)=0$, $\ddot{\varphi}_y(t)=\omega^2\varphi_{0y}\sin\omega t$ とおき、図-2 の振動モデルに対する共振曲線を求めた。得られた結果の一例を図-4, 5 に示す。同図は $e_x=5$ m の場合について、 y 方向加振を行ったときの構造物の y 方向変位及び θ 方向共振曲線を示したものである。点線は TLD がいない場合、実線は TLD を設置した場合である。図の縦軸は、構造物の応答変位を TLD のある場合を $y=Y_{ST}e^{i\omega t}$ 、TLD のない場合を $y=Y_S e^{i\omega t}$ としたとき、その変位振幅 $|Y_{ST}|$, $|Y_S|$ を、構造物の y 方向の静変位 $Y_{S0}=m\omega^2\varphi_{0y}/k_y$ で割って無次元化した値をとっている。同図から並進振動に対しては TLD の制振効果が発揮されているが、回転振動に対しては TLD を設置したときの方がわずかながら応答が大きくなっていることがわかる。なお、図-5 の縦軸は構造物の回転変位を $\theta=\Theta e^{i\omega t}$ としたときの回転振幅 $|\Theta|$ である。TLD の設置場所、配

置、構造物の偏心距離 e_x, e_y 等の条件をいろいろ変えた場合について上記と同様な計算を行って、TLD が構造物の回転振動に与える影響を明らかにし、さらに、構造物に偏心がある場合に TLD を設置することによってその回転振動をおさえる方法等についてさらに検討を行う必要があると思われる。 (参考文献)

1) 高西照彦他：2 方向入力を受ける TLD 付き 3 層ラーメン模型の応答特性、構造工学論文集 Vol.42A, 1996.3.

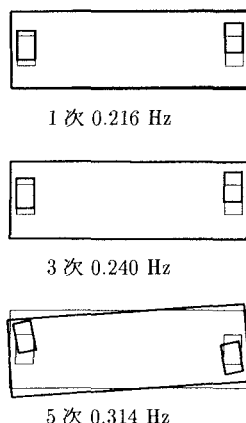


図 3: 固有振動数と振動モード ($e_x=5$ m)

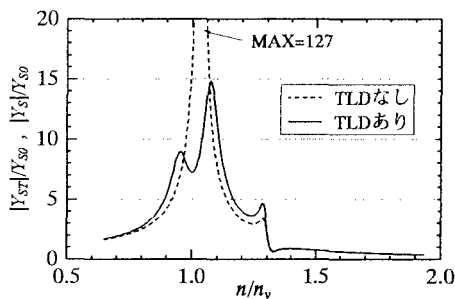


図 4: y 方向加振に対する y 方向の共振曲線 ($e_x=5$ m)

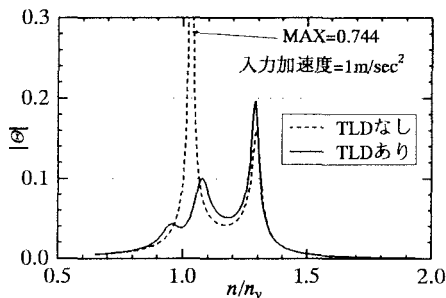


図 5: y 方向加振に対する θ 方向の共振曲線 ($e_x=5$ m)