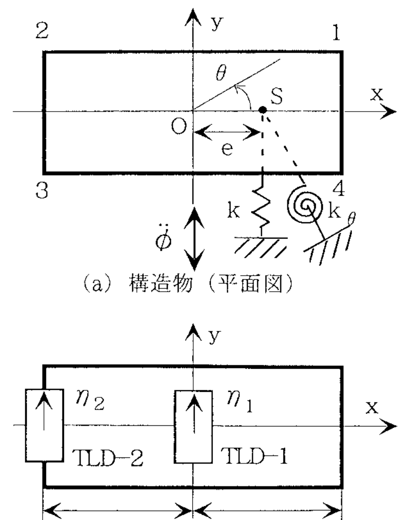
2自由度系構造物に設置したTLDの最適動特性値

正会員　高西　照彦
大分工業高等専門学校　正会員　園田　敏矢

1．まえがき　重心と剛心とが異なる構造物が水平方向の地震入力を受けたときには，水平振動と同時に捩れ振動をも生ずることになる．このような構造物に対する制震対策として同調液体ダンパー（TLD）を用いるとき，TLDとして，それぞれ主として水平振動及び捩れ振動を制震するために2種類のTLDを採用する場合について，それらの最適動特性値（最適振動数比，最適減衰定数，2種類のTLDの質量比）を合理的に定める問題について考える．1自由度系構造物に設置された制震装置に対する最適動特性値の決定方法については，既に良く知られているが，2自由度系以上の構造物に対するそれを取り扱った論文の数は，著者等の知る限り余り多くはないようである[1),2)]．本論では，図-1に示すように，剛心がx軸方向のみにずれている2自由度系構造物が，y軸方向の地震入力を受けた場合について，y方向の水平振動を制震する目的でTLD-1を，θ方向の捩れ振動を制震する目的でTLD-2を構造物に設置したとき，これら2種類のTLDに対する最適動特性値の合理的な決定法について述べた．特に，図-1(a)に示すように，構造物の隅角部（点1，2）のy方向変位に注目したとき，全TLDと構造物の質量比を一定に保つという条件の下において，図-1(b)に示す2種類のTLDの質量比の定め方如何によっては，捩れ振動の影響が無視できず，2次振動による応答変位の方が大きくなる場合もあることを考慮すれば，これら2種類のTLDの質量比を合理的に定めることは重要な問題である．



(a) 構造物（平面図）
(b) TLDの設置
図-1 TLD-構造物系

2．TLDの最適動特性値　図-1(a)に示す構造物の重心Oに対するy方向変位をy，回転角をθとし，s次の基準座標をξ_S，振動形をY_S, Θ_S $(s=1,2)$とすれば，y方向の地震入力加速度$\ddot{\phi}(t)$を受けるTLD-構造物系の振動方程式は次のように表される．　$y=\sum_{S=1}^{2}\xi_S Y_S$，　$\theta=\sum_{S=1}^{2}\xi_S Y_S$　(1-a,b)

$$\ddot{\xi}_S+2h_S\omega_S\dot{\xi}_S+\omega_S^2\xi_S=Q_S/M_S,\qquad (s=1,2)\qquad (2)$$

$$M_S=mY_S^2+J\Theta_S^2,\qquad (s=1,2)\qquad (3)$$

ここに，m, J, ω_S, h_Sは構造物の質量，重心O回りの慣性モーメント，s次の固有円振動数及び減衰定数である．また，Q_Sはs次の一般力で，次式のように表される．

$$Q_S=-m\ddot{\phi}Y_S+m_1(2h_1n_1\dot{\eta}_1+n_1^2\eta_1)Y_S+m_2(2h_2n_2\dot{\eta}_2+n_2^2\eta_2)(Y_S-a\Theta_S)\qquad (4)$$

ここに，m_1, h_1, n_1及びm_2, h_2, n_2はTLD-1及び2の等価質量，減衰定数，1次の固有円振動数（TLDについては1次のみを採用）であり，aは点OとTLD-2間の距離である．また，η_1, η_2はTLD-1，2の基準座標であり，それぞれ次の方程式を満たす．

$$\ddot{\eta}_1+2h_1n_1\dot{\eta}_1+n_1^2\eta_1=-\ddot{\phi}-\sum_{S=1}^{2}\ddot{\xi}_S Y_S\qquad (5)$$

$$\ddot{\eta}_2+2h_2n_2\dot{\eta}_2+n_2^2\eta_2=-\ddot{\phi}-\sum_{S=1}^{2}\ddot{\xi}_S(Y_S-a\Theta_S)\qquad (6)$$

$\ddot{\phi}$が与えられれば，式(1)～(6)から構造物の地震応答を求めることができる．

いま，図-1(a)の点2におけるy方向の絶対変位に注目すれば，それは次式によって得られる．

$$\bar{y}_2 = y - a\theta + \phi = \sum_{S=1}^{2} \xi_S (Y_S - a\Theta_S) + \phi \qquad (7)$$

さて，構造物の減衰は小さいとして，これを無視した場合について，点２における動的応答倍率曲線 $DMF_2(\omega)$ を求める．

$$\phi = \phi_0 e^{i\omega t}, \quad \xi_S = \Gamma_S e^{i\omega t}, \quad \eta_S = \Psi_S e^{i\omega t} \qquad (8)$$

とおいて，式(2),(5)～(7)に代入すれば，それは次式のように表される．

$$DMF_2(\omega) = \left|\bar{y}_2/\phi\right| = \left|\sum_{S=1}^{2} \Gamma_S (Y_S - a\Theta_S)\Big/\phi_0 + 1\right| \qquad (9)$$

上式の絶対値の中はその分母子がそれぞれ ω の４次の多項式からなる分数関数で与えられる．

（a）まず，構造物の１次振動数近傍に存在する動的応答倍率曲線については，$\omega_1 \cong n_1$，$\omega_2 \cong n_2$，$\omega_1/\omega_2 << 1$ の関係が成立するとし，さらに，ω については ω_1 の近傍のみを考えるとすれば，式(9)は

$$DMF_2^{(1)}(\omega) = \left|\bar{A}\omega^4 + \bar{B}\omega^2 + \bar{C} + 2i h_1 n_1 \omega(\bar{G}\omega^2 + \bar{H})\right| \Big/ \left|\bar{D}\omega^4 + \bar{E}\omega^2 + \bar{F} + 2i h_1 n_1 \omega(\bar{I}\omega^2 + \bar{J})\right| \qquad (10)$$

の形に書くことができる．この式は構造物系の２次振動の影響が近似的に考慮された式になっている．いま，$\mu_1 = m_1/m, \mu_2 = m_2/m, \mu = \mu_1 + \mu_2, \gamma_1 = n_1/\omega_1, \gamma_2 = n_2/\omega_2$ とおけば，$\bar{A} \sim \bar{J}$ は μ_1, μ, γ_1 を含む定数である．式(10)はＴＬＤを設置した１自由度系の動的応答倍率曲線と同型であり，この曲線は定点A，B（このときの ω の値を小さい順に ω_A, ω_B とおく）を通ることを利用すればＴＬＤ－１の最適振動数比 γ_1，最適減衰定数 $\bar{h}_1$ を求めることができる．（b）次に構造物の２次振動数近傍については，ω に対して ω_2 近傍の変化のみを考えることを除いて（a）の場合と同様な仮定が成り立つとすれば，このとき式(9)から動的応答倍率曲線 $DMF_2^{(2)}(\omega)$ として式(10)と全く同型の表示式が得られる．ただし，この場合の ω の多項式の係数は $\mu_1, \mu, \gamma_1, \gamma_2$ を含む定数となる．このときも（a）の場合と同様にして，ＴＬＤ－２の最適振動数比 γ_2 と最適減衰定数 $\bar{h}_2$ を求めることができる．なお，$DMF_2^{(2)}(\omega)$ は定点C，D（$\omega = \omega_C, \omega_D$）を通る．（C）最後に，最適振動数比 γ_1, γ_2 にはＴＬＤ－１と構造物の質量比 μ_1 が未知数として含まれている．この μ_1 を定めるために，式(10)と（b）における式(10)と同型の式を用いて

$$DMF_2^{(1)}(\omega_B) = DMF_2^{(2)}(\omega_C) \qquad (11)$$

の条件を課すことにした．以上述べた方法によって，２自由度系構造物に設置された２種類のＴＬＤの構造物に対する全質量比 $\mu = (m_1 + m_2)/m$ が与えられたとき，これら２種類のＴＬＤの最適動特性値（$\gamma_1, \gamma_2, \bar{h}_1, \bar{h}_2, m_2/m_1 = \mu/\mu_1 - 1$）を全て定めることができる．

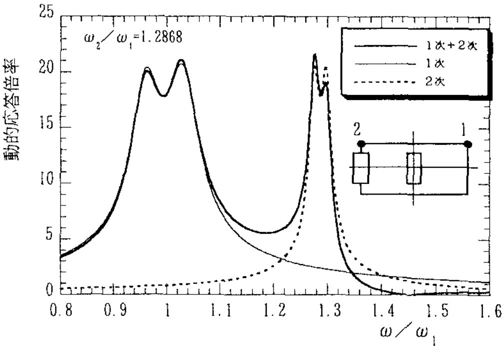
３．数値解析並びに検討

数値解析例として，構造物の有効質量 $m = 2.0276\times10^4$ t，有効慣性モーメント J=1.3142×10^7 t m^2，ばね定数 k=8.6376×10^4 kN/m，回転ばね定数 k_θ=7.987×10^7 kN m/rad，ＴＬＤの構造物に対する全質量比 μ=0.01 の場合を取り上げた．また，偏心距離 e=5 m，重心ＯとＴＬＤ－２間の距離 a = 35 m である．このとき $\omega_2/\omega_1 = 1.29$ である．

図－２はＴＬＤが最適動特性値を取る場合の点２における動的応答倍率曲線を示したものである．このときの最適値は，

$\gamma_1 = 0.9909, \gamma_2 = 0.9992, h_1 = 0.0556,$

$h_2 = 0.0136, \mu_1 = 0.009447$．（したがって，$\mu_2 = 0.000553, m_2/m_1 = 0.0585$）である．太実線で示した曲線はその４個のピーク値の間に僅かな差が認められるものの，実用的にはこれら応答曲線の４個の最大値は殆ど等しいと考えてもよいと云えよう．



図－２ 構造物の点２における動的応答曲線

1) 背戸一登：動吸振器による多自由度系の制振（第１報），日本機会学会論文集（C編），50巻458号，昭59.10.

2) G.B.Warburton: Optimum absorber parameters for minimizing vibration response, Earthq. Eng.and Str. Dyn., vol.9, (1981).