

I-B 27

円筒形 TLD-構造物系の非線形連成応答解析

東京大学 大学院 (正) 若原 敏裕

東京大学 土木工学科 (正) 藤野 陽三

1. はじめに 高層建物やタワー等の風による応答は、風向方向と風向直角方向の2方向の水平外力を受け、また、構造物の平面形状によっては振り外力の影響も加わるため、その応答特性は必ずしも1方向に卓越するとは言えず、むしろ、応答の平面的な軌跡は、風向方向と風向直角方向に $\pi/2$ 程度の位相差を持った円軌道あるいは風向直角方向に長い楕円軌道となることが知られている。構造物の制振に用いる同調液体ダンパー（以下、TLD）の解析にも、当然の事ながら、このような2方向同時加振の影響を考慮する必要がある。本報告は、この影響について考察するため、2方向同時加振時の円筒形 TLD-構造物系の非線形連成応答解析を行い、その解析結果の一例を示したものである。

2. 基礎方程式 スロッシングの基礎方程式として、波頂曲率まで考慮可能な Boussinesq 方程式を用いる。図-1 に示すように半径 R 、水深 h の円筒形 TLD を考え、 $x-y$ 平面が静水面と同じになるように座標系を設定する。また、構造物モデルとして、図-1 に示すような x, y 方向の固有円振動数、減衰定数が各々、 $\omega_x, \xi_x (x=x, y)$ であるような構造系を考え、その質量を m_s とする。これより、円筒形 TLD と構造物の相互作用系は、構造物に対する振動方程式と容器内のスロッシングに関する Boussinesq 方程式により、式(1)～(5)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} m_s \ddot{x}_s + 2\xi_x \omega_x m_s \dot{x}_s + \omega_x^2 m_s x_s &= F_x + F_{Dx}(\ddot{x}_s, \ddot{y}_s) \\ m_s \ddot{y}_s + 2\xi_y \omega_y m_s \dot{y}_s + \omega_y^2 m_s y_s &= F_y + F_{Dy}(\ddot{x}_s, \ddot{y}_s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$F_{Dx}(\ddot{x}_s, \ddot{y}_s) = \frac{\rho g}{3} \oint_{\Gamma} (h + \eta)^2 n_x d\Gamma - \frac{\rho h}{3} \oint_{\Gamma} (h + \eta)^2 \left\{ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y \partial t} \right\} n_x d\Gamma \quad (x=x, y) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (h + \eta) \bar{u} \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h + \eta) \bar{v} \} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \gamma_C \bar{u} + \ddot{x}_s = \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 \bar{v}}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \gamma_C \bar{v} + \ddot{y}_s = \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 \bar{v}}{\partial y^2 \partial t} \right) \quad (5)$$

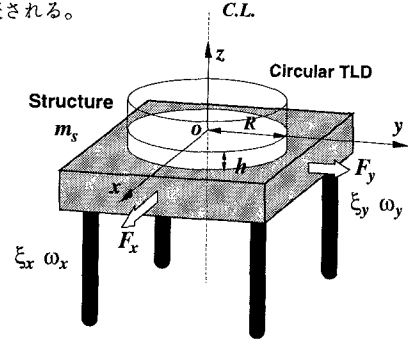


図-1 解析モデル

ここに、 x_s, y_s および $\bar{u}, \bar{v}$ は各々 x, y 方向の構造物応答と液体の平均流速であり、 η は液面変位である。また、 $F_x, F_{Dx} (x=x, y)$ は外力と TLD からの流体反力を表す。また、 Γ は円筒容器の側方境界を表し、 $n_x (x=x, y)$ は境界上の外向法線ベクトルの方向余弦である。なお、 γ_C は TLD 容器底面と流体運動の摩擦に起因する減衰係数である¹⁾²⁾。有限要素法にて Boussinesq 方程式を解析し、時間方向の数値積分法として Leap-Frog 法を用いた¹⁾²⁾。また、構造系の振動方程式に対しては Runge-Kutta 法を用いて応答の数値積分を行った。

3. 解析条件 本報告では、 x, y 方向の外力として、非制振時の構造物の共振振動数における変位振幅が $D_x (x=x, y)$ になるような調和外力 $F_x (x=x, y)$ を考え、2方向同時入力に際して、両者の位相差を ϕ_{xy} を考慮する。構造物として、 x, y 方向の固有振動特性が等しい構造系を考え、固有振動数 $f_s (= \omega_x/2\pi = \omega_y/2\pi) = 0.75\text{Hz}$ 、減衰定数 $\xi_x = \xi_y = 0.01$ とした。TLD として $R = 24\text{cm}$ の円筒容器を考え、同調比 $\gamma (f_L/f_s) = 1$ を満足するように水深を $h = 4\text{cm}$ に設定した。また、構造物と TLD の液体の質量比 $\mu (= \rho \pi R^2 h / m_s) = 1\%$ とした。

4. 1方向加振時の解析結果 図-2 と図-3 は TLD の非線形性について考察するため、外力の振幅を変え1方向加振した場合の構造物応答を示したものである。図-2 が $D_x/R = 0.03$ の場合であり、図-3 は $D_x/R = 0.07$ の場合を示している。なお、参考のため、ほぼ理想的な減衰定数 $\xi_T = 0.05$ の TMD を設置した場合の構造物応答も示している。 $D_x/R = 0.03$ の場合は、まだ応答振幅が小さいため、TLD の等価減衰は理想的な TMD の場合と比較して小さく、応答曲線の2つのピークは TMD のそれと比較して大きな値となる。 $D_x/R = 0.07$ の場合は、振幅の増加に伴い、波の非線形性の影響で TLD の等価減衰が増加し、理想的な TMD の場合に近づく傾向を示す。また、TMD の場合と比べて、非線形性に伴う高調波励振¹⁾²⁾の影響により、高振動数側で2つのピークをとる。

5. 2方向加振時の解析結果 図-4 と図-5 は2方向同時加振時の解析結果示したものである。実際の風による構造物応答を想定し双方の外力の位相差は、 $\phi_{xy} = \pi/2$ とした。図-4 は $D_x/R = D_y/R = 0.03$ の場合であり、図-2 と図-4 の比較より、1方向加振時と比べて応答曲線の2つのピークが大きくなり、外力の振幅が同じであっても、位相差 $\pi/2$ の2方向加振時の場合、TLD 内の波の挙動は旋回運動に近く、結果として得られる等価減衰は1方向加振時の場合と比べて小さいものと考えられる。図-5 は $D_x/R = 0.07, D_y/R = 0.03$ の場合であり、 x 方向と y 方向の外力の振幅比が 2.3:1 である。この

場合、加振振幅が大きい x 方向の応答は理想的な TMD の応答曲線に近く、ほぼ最適減衰に近い等価減衰が得られている。しかし、 y 方向の応答は、低振動数側のピークが大きく、非制振時の応答と同レベルの応答を示す結果となっている。図-4 と図-5 の結果から、TLD の流体反力は、図-4 のような比較的低振幅で方向性が少ない振動特性を有する構造系の場合、両方向の応答を効率よく制振するように作用し、図-5 のようにある程度応答が 1 方向に卓越する場合には、応答の卓越する方向の振動を抑えるように作用するものと考えられる。

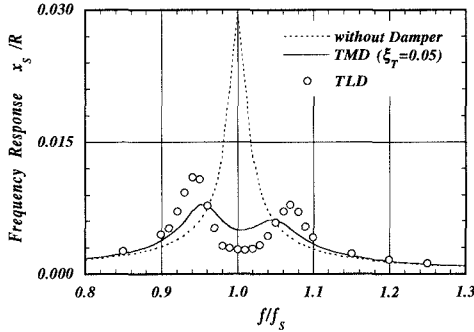


図-2 1 方向加振時の応答
(非制振時の共振変位 $D_x/R=0.03$)

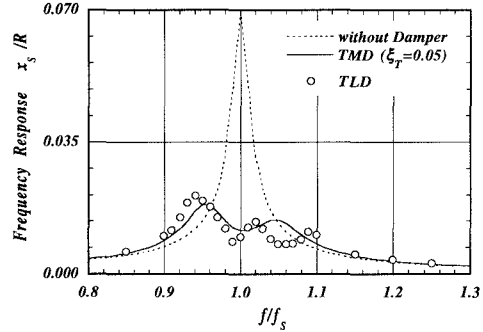


図-3 1 方向加振時の応答
(非制振時の共振変位 $D_x/R=0.07$)

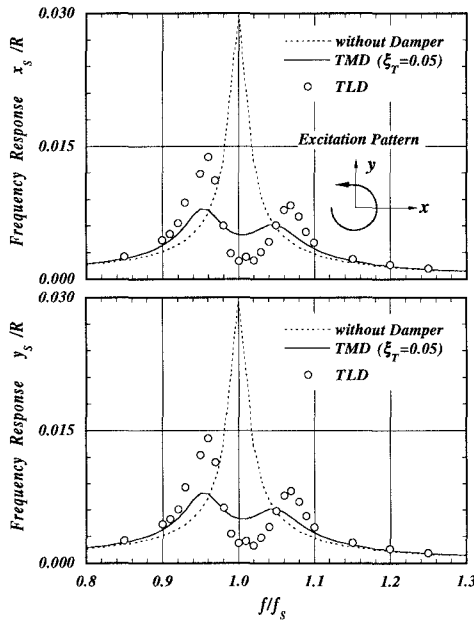


図-4 2 方向加振時の応答
($D_x/R=0.03, D_y/R=0.03$)

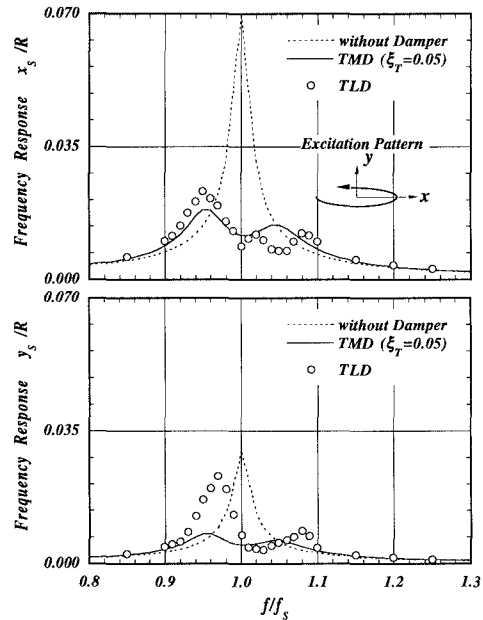


図-5 2 方向加振時の応答
($D_x/R=0.07, D_y/R=0.03$)

7. あとがき 実際の風による構造物応答を想定し、双方の外力の位相差を $\pi/2$ とした 2 方向同時加振時の円筒形 TLD-構造系の非線形連成応答に対して、2 つの解析例を挙げ、その特徴について考察した。その結果、加振振幅が同程度であっても、2 方向加振の場合には流体反力を生み出す波の伝播機構が異なるため、1 方向加振の場合と比べて異なった応答特性が得られ、応答の制振効果にも差を及ぼすものと考えられる。

参考文献

- (1) 若原敏裕、藤野陽三：有限要素法による円筒形同調液体ダンパーの 3 次元非線形解析、第 49 回土木学会年次学術講演会概要集、1994 年。
- (2) 若原敏裕、藤野陽三、野村卓史：Boussinesq 方程式を用いた円筒形同調液体ダンパーの非線形スロッシング解析、土木学会論文集 1 部門、投稿中。