

I-471

回転振動を受ける同調液体ダンパー内波動
—理論解析及び実験—

東京大学

正会員
学生会員
正会員古賀健一
孫利民
藤野陽三

B. M. パチェコ

1. まえがき

剛性容器内液体の動揺を利用した制振装置（TLD、TLCDなど）の研究は最近盛んに行なわれている。これらは水平振動の振動問題を注目している（例えば、[1]）。本論文では構造物鉛直面内回転振動（風などの外力による橋桁のねじれ振動など）におけるTLDの制振効果を検討するため、理論解析と実験を行なった。

2. 理論解析（定式化）

支配方程式 本研究[2]では矩形容器の浅い液体の動揺を利用したTLDを対象とする。容器のサイズは幅 $2a$ 、奥行き b 、液体深さ h で表わされる。図1に示すように、固定座標 XOZ に対して、TLD容器とともに移動する xoy 座標系を考える。回転中心に xoz 系の原点をとり、容器は水平変位 X_0 、垂直変位 Z_0 、回転変位 θ を同時に受けていると考える。液体の xoz 系に対する流速を u, w 、また液体の変位を η 、圧力を p 、流体の密度を ρ 、動粘性係数を ν 、重力加速度を g とする。ここで、加振振幅が小さく、波は碎波状態になっていない xz 平面内のみの2次元波とし、また液体は非圧縮で、自由表面上での圧力 p_0 は一定と仮定する。容器内液体動揺の支配方程式としての連続方程式と運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + a_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + a_z \quad (3)$$

ここで、 a_x, a_z は xoz 系に対する液体が受けた慣性加速度である。

境界条件は

$$\begin{aligned} u &= 0 & (x = \pm a) \\ w &= 0 & (z = 0) \\ w &= \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad p = p_0 = \text{const} & (z = h + \eta) \end{aligned} \quad (4)$$

である。

慣性力 a_x, a_z は下記のように傾きによる重力項、コリオリ項、回転接線加速度項、回転遠心力項、及び平移加速度項により構成される。

$$a_x = -g \sin \theta + 2\dot{\theta}w + \ddot{\theta}z + \ddot{X}_0 \cos \theta - \ddot{Z}_0 \sin \theta \quad (5)$$

$$a_z = -g \cos \theta - 2\dot{\theta}u - \ddot{\theta}x + \ddot{X}_0 \sin \theta - \ddot{Z}_0 \cos \theta \quad (6)$$

この内、高次オーダー項を省略すると、式(5)、(6)は

$$a_x = -(g + \ddot{Z}_0) \sin \theta + \ddot{\theta}z - \ddot{X}_0 \cos \theta \quad (7)$$

$$a_z = -(g + \ddot{Z}_0) \cos \theta - \ddot{\theta}x + \ddot{X}_0 \sin \theta \quad (8)$$

となる。

基礎方程式 連続式(1)を z について0から η まで積分し、自由表面の波高 η と流速 u_s に関する式とする。運動方程式(2)と(3)については圧力 p を消去し、 z について0から η まで積分すると、もう1つの η と u_s に関する方程式を導く、すなわち、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial (\phi u_s)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial u_s^2}{\partial x} + ((g + \ddot{Z}_0) \cos \theta - \ddot{X}_0 \sin \theta - \ddot{\theta}x + (g + \ddot{Z}_0) \cos \theta + h \sigma \phi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}) \frac{\partial \eta}{\partial x} = -(g + \ddot{Z}_0) \sin \theta + \ddot{X}_0 \cos \theta - \lambda u_s \quad (10)$$

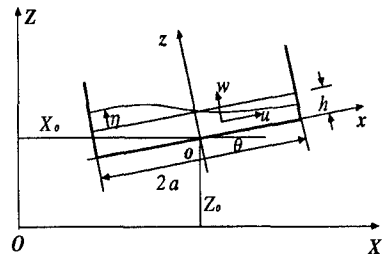


図1 回転座標系

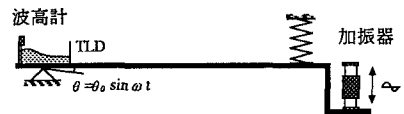


図2 実験装置

ここで、 $\sigma = \tanh(kh)/(kh)$ 、 $\phi = \tanh(k(h+\eta))/\tanh(kh)$ 。また λ は容器底面、側壁、液面の減衰への寄与を考慮する減衰項の係数であり、次のように表わされる。

$$\lambda = -\frac{1}{\eta+h} \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\omega \nu} (2+2h/b) \quad (11)$$

ただ ω は加振角振動数である。

式(10)からみると、回転運動によって、重力加速度 g の x 方向成分は加振力として働くことがわかる。連立方程式(9)と(10)を差分法を用い数値的に解き、液面変位 η と表面流速 u_s を求める。

3. 実験と考察

実験に使用した容器は $2a=59.0\text{cm}$ 、 $b=16.75\text{cm}$ である。水深 h は 3.0cm で、浅水状態($h/a \ll 1$)にある。液面動揺の第一次線形固有振動数 f_w は 0.458Hz である。容器は加振装置(図2)にのせ、正弦波回転運動($X_0=0, Z_0=0, \theta=\theta_0 \sin \omega t$)を与える。加振振幅 θ_0 を一定に保ち、加振振動数 f ($0.8 < f/f_w < 1.2$)を変化させ、壁近くに設置した波高計により液面高さ η を測定する。加振振幅は $\theta_0=0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.3^\circ$ の3ケースである。

図3は水深 h で無次元化されたTLD容器壁近くの液面振幅の応答である。液面の最大応答にはハードニング非線形性が見られる。

数値解析の結果と比較してみる。非線形性の現われる振動域で若干理論値が大きくなっているが、実験でみられた高調波も確認されており、傾向的には合っている。 $\theta_0=0.3^\circ$ の場合、波は碎波状態に近くなっており、碎波を考えていない理論値は過大評価となる。全般的には、理論値が実験値より大きい、減衰の過小評価と加振波の精度(実験時、完全な正弦波加振ができなかった)の原因が考えられる。

4. TLD-構造物の連成振動シミュレーション

回転振動におけるTLDの制振シミュレーションを行い、構造物の応答は図4に示す。回転自由度を持ちSDOF構造物に前述実験のTLDを載せ、静止状態時液体と構造物の極慣性モーメント比 $I_w/I_s=0.01\%$ で、構造物固有振動数は 0.458Hz 、対数減衰率は 0.015 として計算した。回転振動の場合にも、TLDにより構造物の揺れが抑えられることがわかる。

5. まとめ

本論文で提案した数値解析法により計算した理論値は実験値と小振幅では整合的である。さらにそれによりTLD-構造物のシミュレーションも行い、回転振動に対してのTLD有効性を検討した。今後、TLD内波動減衰についての検討とTLD-構造物の連成振動の実験的検証が必要である。

[参考文献] [1]藤野陽三他、構造工学論文集 Vol.35A (1989年3月)。 [2]古賀健一、東大土木工学専攻修士論文 (1990年2月)。

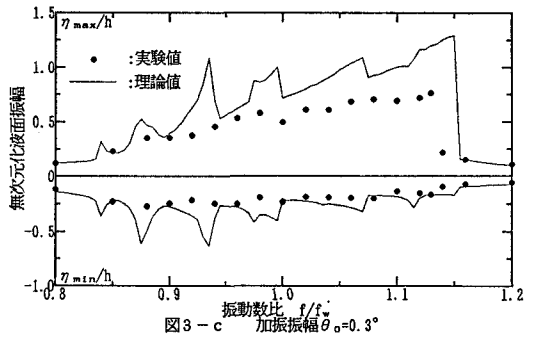
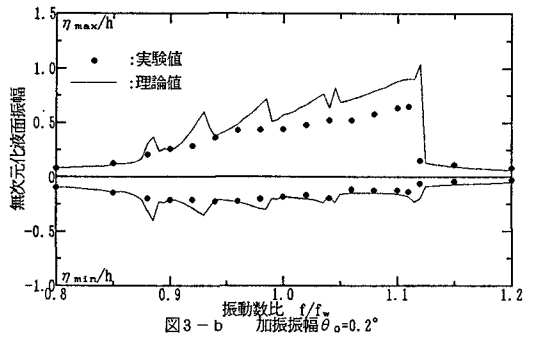
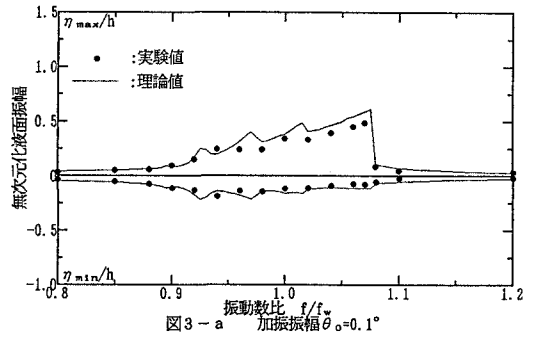


図3 液面応答の実験値と理論値との比較

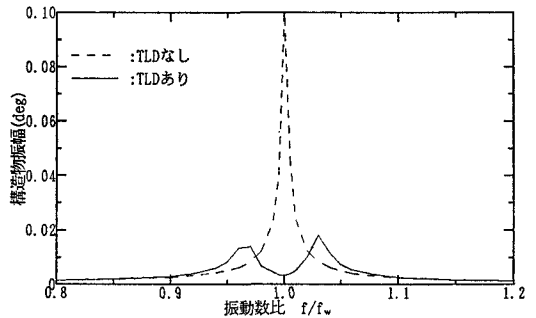


図4 TLDを載せた構造物の応答