

回転振動を受ける同調液体ダンパーに関するシミュレーションと実験 Simulation and Experiment on Tuned Liquid Damper subjected to Pitching Motion

藤野陽三* 孫利民** 古賀健一***

Yozo FUJINO, Limin SUN and Kenichi KOGA

Liquid motion in rectangular TLD subjected to pitching motion is studied analytically and experimentally. Shallow water wave theory is applied to describe the liquid motion under the condition of continuous liquid surface(no breaking wave) and the basic equation is obtained. Damping of liquid is used in the simulation. Experiment is also conducted and it is found that agreement between experiment and prediction is very good unless the breaking waves occur. Interaction of a SDOF structure and TLD is also studied numerically and the effectiveness of TLD for pitching motion is demonstrated.

1. まえがき

容器内の液体動揺を利用した制振装置(TLD、TLCDなど)についての活発な研究が私どものグループ(文献1~3)も含めいろいろな機関で行なわれている。しかしそのほとんどが水平振動を対象としており、鉛直面内の回転振動(たとえば橋桁のねじれ渦励振)を対象としたものは文献4の予備的な実験的研究、文献5の等価質量、等価剛性の評価に関するものを除いてはない。

本研究では、矩形容器TLD内の液面動揺を非線形波動理論を用いて定式化し、また実験によりその検証を行なう。さらに構造物-TLD系の応答をシミュレーションにより求め、その制振効果を明らかにする。

2. 定式化

2.1 支配方程式

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 、液体深さを h とする。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 xoz 座標を考える。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 を同時に受けると考える。液体の xoz

* Ph.D 東京大学工学部土木工学科 教授 (〒113 文京区本郷7-3-1)

** 工修 東京大学工学系大学院博士課程 (〒113 文京区本郷7-3-1)

*** 工修 鹿島建設株式会社

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 、重力加速度を g とする。ここで、加振振幅が小さく、波は砕波状態になっていない xz 平面内のみの2次元波とする。また液体は非圧縮、渦なしとし、自由表面上での圧力 p_0 は一定と仮定する。

連続の式は

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

である。液体として水を考えると、粘性は低いのでその影響は底面でのうすい境界層にのみにあると考えてよい。すなわち、境界層の上($z \geq h_b$ ここで h_b は底面境界層厚、 $h_b \ll h$)ではポテンシャル流と考える。

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

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

ここで a_x 、 a_z は xoz 系に対するそれぞれ x 方向、 z 方向の慣性加速度である。境界条件は

$$\begin{aligned} u &= 0 & (x = \pm a) \\ w &= 0 & (z = h_b) \\ w &= \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad p = p_0 = \text{一定} & (z = h + \eta) \end{aligned} \quad (4)$$

である。

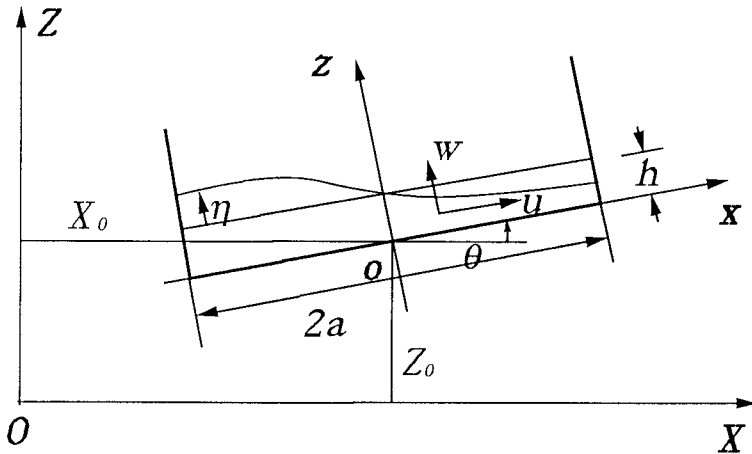


図1 回転座標系

2.2 慣性力

加速度 a_x 、 a_z は下記に示すように重力項、コリオリ項、回転接線加速度項、回転遠心力項、及び平行移動加速度項により構成される。

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

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

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。

2.3 基礎方程式

容器内の流れは、 x 、 z 方向の流速成分をもち、２次元の流れである。そこで、ポテンシャル Φ として変数分離型の $\Phi = F(x, t) \cosh[kz]$ （ k は波数）を仮定する。このことにより u と w の関係が一意的に決まることになる。連続の式を h_b から $h + \eta$ まで積分し、自由表面での波高 η と流速 u_s に関する式とする。運動方程式については圧力 P を消去し、これによりもう一つ h_b から $h + \eta$ まで積分し、波高 η と自由表面での流速 u_s に関する式とする。すなわち、

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

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

ここで $\sigma = \tanh(kh)/\{kh\}$ 、 $\phi = \tanh(k(h + \eta))/\tanh(kh)$ である。

なお、式（１０）の λ は容器底面、側壁に生ずる境界層、ならびに液面のsurface contaminationの減衰への寄与を示す減衰項の係数である。文献２と同じように、それを層流境界層の線形理論により評価すると

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

ここで ω は加振角振動数、 ν は液体の動粘性係数である。

式（１０）からわかるように、液体には水平方向の容器の動き $\ddot{X}_0$ と、回転運動 $\theta(t)$ による、重力の x 方向成分が主に加振力として作用することになる。

文献２と同様に、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. TLDの回転方向振動実験

3.1 実験装置

数値シミュレーションの結果の妥当性を確かめるため、また回転運動を受けるTLDの液体動揺の特性をみるために回転方向の強制加振実験を行なった。

回転方向の加振実験を行なうにあたり、回転方向の振動が可能な振動台を作成した（図２）。端部に加振器を取り付け、鉛直に正弦波加振し、それによりビームに回転方向の振動を起こさせる。TLD容器は支点の真上に設置して実験を行なった。



図2 回転加振のための実験装置

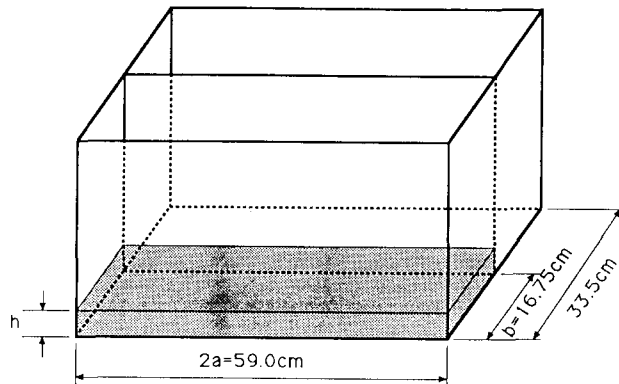


図3 TLD容器

実験でのTLD容器は液体動揺を理論解析上、比較的簡単な2次元問題として扱える矩形容器を用いた。この矩形容器は長さ $2a=59\text{cm}$ 、奥行き 33.5cm で、 5mm の厚さの亚克力板できている(図3)。奥行き方向の波(ねじれ波)、つまり3次元の波を防ぐために奥行き方向を仕切り板により2つに分けて奥行き $b=16.75\text{cm}$ の容器として用いた。

TLD容器の端部付近と中央部に容量式波高計を設置し、液体表面の動きを測定した。なお、振動台の変位は光学式変位計を用いて測定した。

3.2 実験方法

TLD容器の内容液としては水を用い、その水深は $h=3.0\text{cm}$ と $h=4.0\text{cm}$ の2ケースで行なった。水は浅水状態($h/a < 1$)にある。液体動揺の第一次固有振動数 f_w は線形理論によれば、

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\pi g}{2a} \tanh \left(\frac{\pi h}{2a} \right) \right\}^{1/2} \quad (12)$$

で求められる。したがって

$$h=3.0\text{cmの場合: } f_w=0.458\text{Hz、固有周期 } T_w=2.18\text{sec}$$

$$h=4.0\text{cmの場合: } f_w=0.527\text{Hz、固有周期 } T_w=1.90\text{sec}$$

である。

実験において、水ははじめ静止状態とし、一定振幅の正弦波ピッチング変位を与えた。加振振動数は適宜変化させた。加振振幅は $h=3.0\text{cm}$ のケースでは $\theta_0=0.1\text{deg}$ 、 0.2deg 、 0.3deg の3ケース、 $h=4.0\text{cm}$ のケースでは $\theta_0=0.1\text{deg}$ の1ケースである。加振振動数 f はいずれのケースも振動数比 f/f_w が $0.8 < f/f_w < 1.2$ の範囲で変化させた。

実験では振動台を加振器のおもりを鉛直運動させることより加振し、それによってTLDに回転運動を与えている。しかし、振動台を加振する加振器の出力がそれほど強くないため、大きな振幅をだすために振動台自身の固有振動数を 0.5Hz 付近に合わせる必要が生じた。しかし、この振動台は構造減衰が小さいため、共振点付近ではわずかな振動数の違いで振幅が大きく変化し、スイープ試験の場合、振幅を一定にする調整が非常に難しい。すなわち振動台の運動にうなりが生じやすくなり、振幅を正確に一定にすることはなかなか困難な場合があった。また加振振動数が 0.5Hz 前後と低いため、加振器自身もきれいな正弦波の動きを作成することがむずかしかった(図4)。

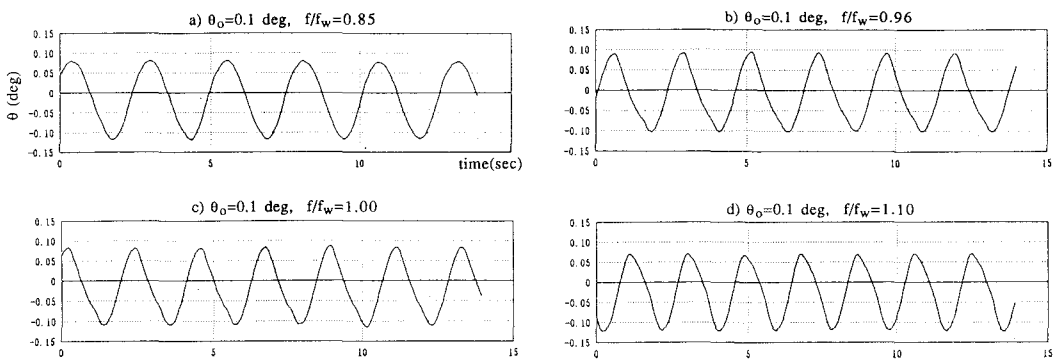


図4 加振変位波形の例

データの整理は、まず記録したアナログデータから各振動数における液面変位 η の最大値と最小値を求め、そしてそれを水深 h で除し、無次元化して表わす。

3.3 実験結果

水深 $h=3.0\text{cm}$ 、振幅 $\theta_0=0.1\text{deg}$ のときの容器端部に置かれた波高計による液面変動の時刻歴を例として図5に示す。低い振動数域では線形の波が見られるが($f/f_w=0.85$)、やがて波の形も著しく変化し、上下非対称になり、また1周期内に2つ以上の波が存在する高調波が現われる。その波の峰がはじめは1周期内に5つ、4つと確認できるが、加振振動数が高くなるにつれてその数は減ってゆき、最後は1つになって、ある振動数で急激に波高が落ち、波の動きも線形的になる。このように浅水状態で水平方向の加振実験での傾向と同様、非線形性の強い現象が生じる。

$\theta_0=0.2\text{deg}$ 、 0.3deg の場合でも同じような傾向がみられた。ただし振幅が大きくなると非線形の波がみられる範囲が広く、 0.3deg のケースでは高調波で1周期内に波の峰が6つまで確認された。

3.4 実験値とシミュレーション値との比較

実験を行なったそれぞれのケースについて数値シミュレーションを行なった。ここでは静止状態から与えられた振幅で加振し、120サイクルまで計算を行ない、最後の20サイクルをとり、液面変動の各サイクルでの

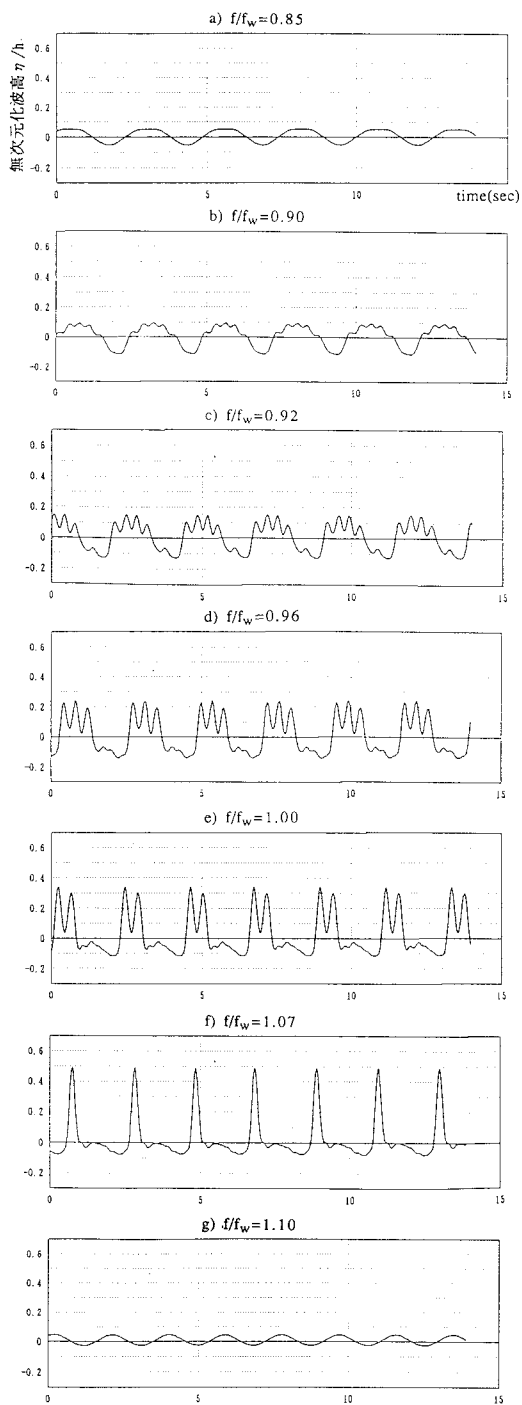


図5 TLD容器端部の液面動揺時刻歴
(実験値、水深 $h=3.0\text{cm}$ 、加振振幅 $\theta=0.1^\circ$)

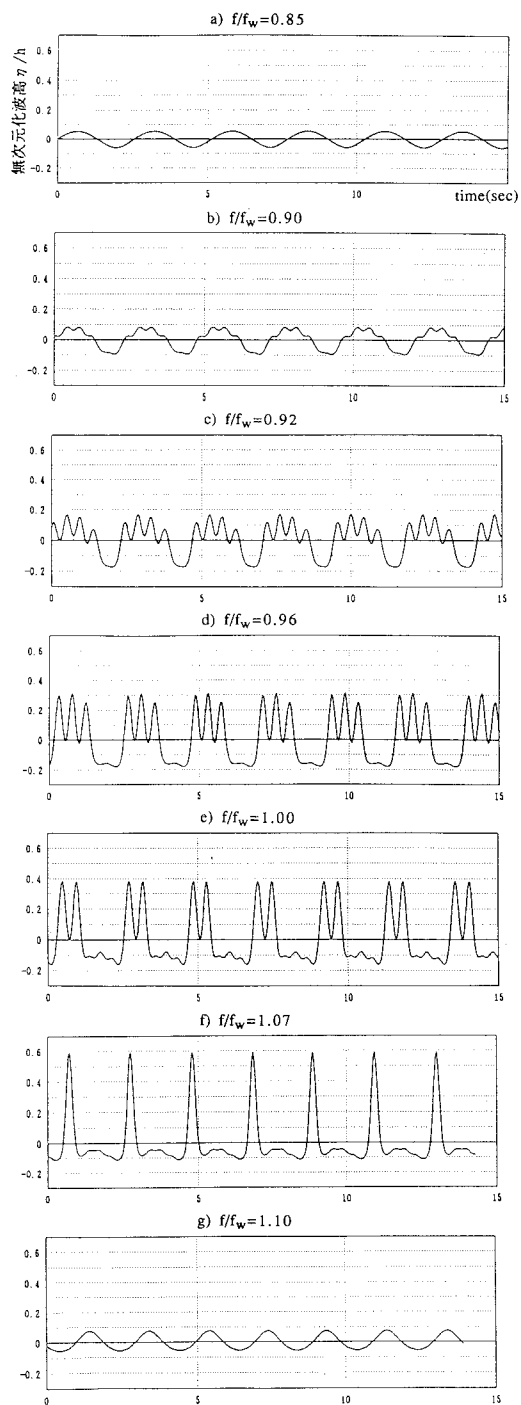


図6 TLD容器端部の液面動揺時刻歴
(シミュレーション値、水深 $h=3.0\text{cm}$ 、加振振幅 $\theta=0.1^\circ$)

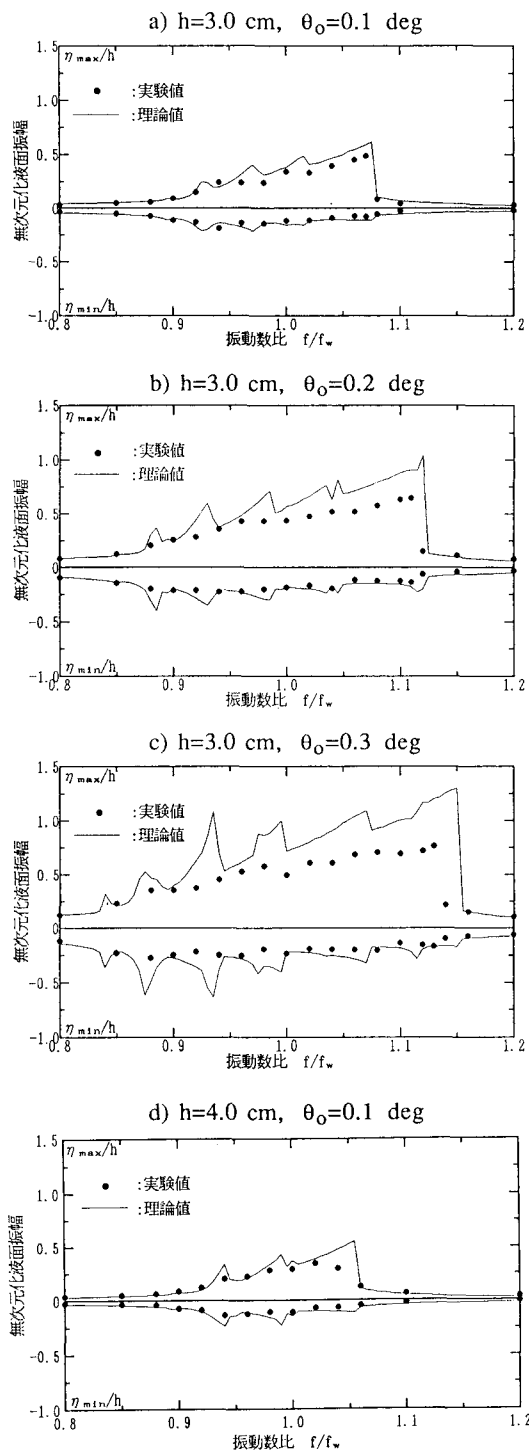


図7 液面動揺周波数応答

最大値と最小値を平均し、それを水深で除して、その振動数での値とする。振動数比は0.800から1.200の間で0.005刻みでスweepさせる。

図6にシミュレーションにより求めた容器端部での液面動揺の波形を示す。これを実験で求めた波形、図5と比較すると、波の形、振幅ともに整合的であることがわかる。

各振動数に対する波高（水深 h で無次元化）を示したのが図7である。その実験値も比較のために示してある。 $\theta_0=0.1^\circ$ （図a）では両者の一致はよいが $\theta_0=0.2^\circ$ （図b）、 0.3° （図c）ではシミュレーション値が実験値よりやや大きい。このことはシミュレーションで用いた波の減衰が実際より小さく評価されている可能性を示唆している。なお、図7 d)の $h=4.0\text{cm}$ のときは共振点付近で加振がうまくいかなかった。シミュレーションの結果との間に差があるのは実験方法に問題があったと考えている。

式(11)の λ の係数 $1/\sqrt{2}$ の値を変えて計算してみたのが図8である。 λ の値は振幅に応じて大きくする（減衰が高くなるということ）のが適当といえる。波高に応じてどのような値にするかについては、現時点では理論もなく、いろいろな実験ケースから経験的に決めざるを得ないであろう（文献6）。ただし、碎波をシミュレートできる数値解析法としてMAC法などいくつか提案されている。その適用性を現在研究中である。

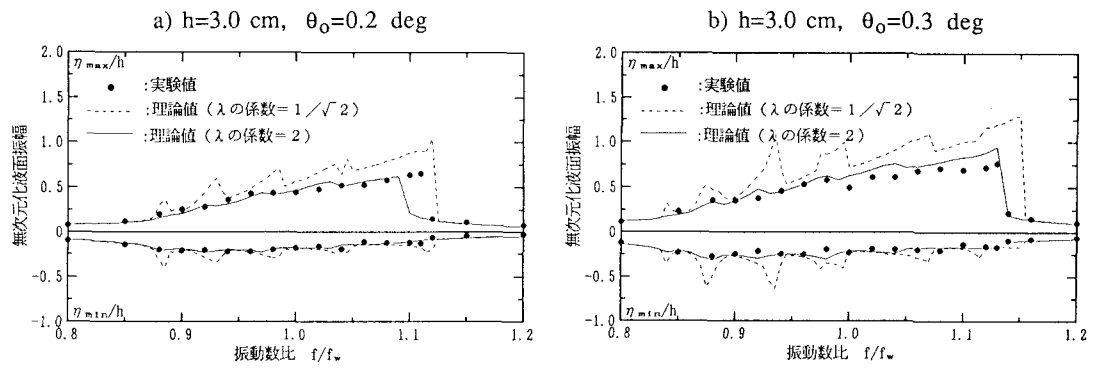


図8 λ の値の影響

4. 構造物-TLD系の連成振動シミュレーション

TLDを鉛直面内で回転振動する構造物の制振（図9）に用いた際の減衰効果を、2. で示したシミュレーション法を用いて検討する。

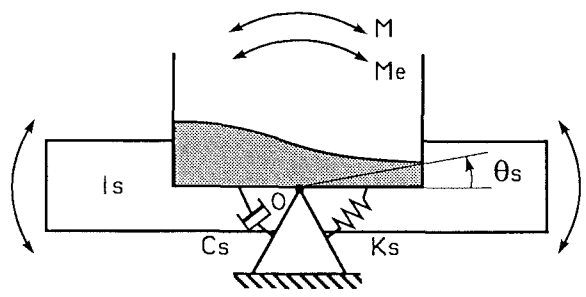


図9 構造物+TLD系

4.1 液体動揺により容器に作用するモーメント

水平振動の場合は、TLDの両側壁に作用する水圧差が構造物に作用するせん断力になる。回転振動の場合には、両側の壁に作用する水圧がつくるモーメントだけではなく、液体の動きに伴う重心の移動が形成するモーメントも構造物に作用する。

回転振動を行なう構造物にTLDを載せたときの運動方程式は

$$I_g \ddot{\theta}_g + C_g \dot{\theta}_g + K_g \theta_g = M + M_e \quad (13)$$

すなわち

$$\ddot{\theta}_g + 2\omega_g \xi_g \dot{\theta}_g + \omega_g^2 \theta_g = (M + M_e) / I_g \quad (14)$$

である。ここで I_g 、 C_g 、 K_g はそれぞれ構造物の回転慣性、減衰係数、回転ばね定数である。 ξ_g 、 ω_g は減衰定数、固有円振動数。 θ_g は構造物の回転変位であり、 M_e は外力モーメント。 M はTLDが構造物に作用するモーメントであり、 θ_g の関数である。与えられた外力モーメント M_e に対する θ_g は、式(13)もしくは式(14)と2.のシミュレーションとの連立させて解けばよい。

M_e として調和外力モーメントを想定し、Runge-Kutta-Gill法により、時間刻みの幅 Δt を外力周期の1/60に設定し、定常応答に達するまで(120サイクルとした)を求めた。TLDの容器としては実験に用いたのと同じ、 $2a=59\text{cm}$ 、 $b=16.75\text{cm}$ 、水深 $h=3\text{cm}$ とした。構造物の減衰定数 ξ_g 、固有円振動数 ω_g として $2\pi \times 0.015$ 、 $2\pi/2.0$ とした。結果を図10に示す。図中の I_w は原点0まわりのTLDの回転慣性であり、これをパラメータにとっている。

$I_w/I_g=0.001\%$ 程度で制振効果があることがわかる。このように水平振動の制振に比べ小さい回転慣性比で大きな制振効果が生ずる。これはTLDの壁に生ずる水圧のつくるモーメントだけでなく液体の動きにともなう重心の移動がつくるモーメントが制振(モーメント)力として作用し、後者の効果が大きいからである。

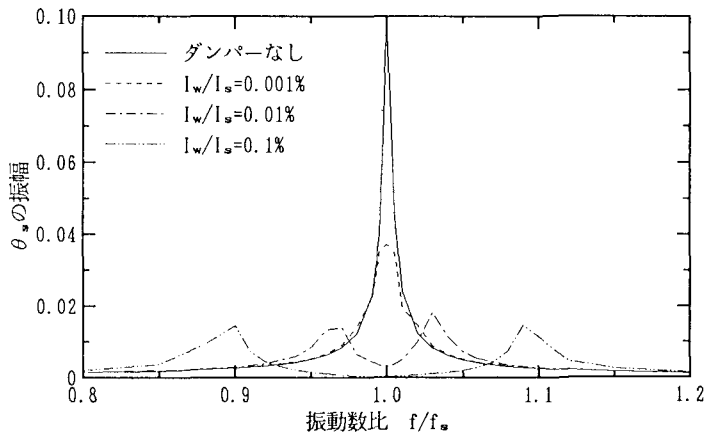


図10 TLDの制振効果

5. まとめ

回転方向の移動を受ける T L D の液体動揺の非線形性について実験と数値シミュレーションの両方から研究を行なった。ただし、対象としたのは浅水波で、また砕波が起こる前の状態である。

実験では、装置の都合上、必ずしもきれいな正弦波で加振ができたわけではないが、T L D の水平方向の加振実験でも見られた強い非線形性が確認された。また非線形波動解析を行ない、数値シミュレーションの方からも波の非線形性を再現できた。小振幅の場合には波の形も波高もシミュレーション値と実験値とがよく一致しており、数値シミュレーションの妥当性も確認された。ただし、大きな振幅になるとシミュレーションでの波が実験値の波よりも高めに計算されており、式(11)による減衰は過小評価されている可能性がある。

また、回転系の構造物に T L D を設置したモデルでこの非線形波動解析を使って数値シミュレーションを行ない、その相互作用を調べ、実際に T L D が回転振動に有効であることを確認した。T M D や水平方向の T L D の場合には構造物との質量比を約 1 % にしてその制振効果を得ているが、ここでの回転振動に用いた T L D では構造物との慣性モーメント比が 0.01 % ~ 0.1 % 程度の小さな値でかなりの制振効果を上げるという数値シミュレーションの結果が出た。これは T M D や水平方向での T L D では、構造物の振動によるダンパーの慣性力が構造物に作用し、それが制振のはたらきをするのに対し、鉛直面内の回転運動の場合ではダンパーから構造物に作用するモーメントは主に液体の重心の移動が支配しており、水平振動の場合よりも構造物に及ぼす制振効果が大きくなるからと思われる。

なお、構造物との相互作用では、数値シミュレーションの妥当性を確認する実験を行なう必要があると考えている。

謝辞 本研究を行なうにあたり、パチェコ助教授、チャイセリ君（ともに東京大学）にお世話になりました。また、藤井邦雄部長（清水建設）には研究を進めるにあたりいろいろと便宜をいただきました。ここに記して感謝いたします。なお、本研究は科学研究費（試験研究）ならびに東大と民間（清水建設技術研究所）との共同研究の補助を受けて行なわれたことを付記します。

参考文献

- 1) 藤野、パチェコ、チャイセリ、藤井：同調液体ダンパー（T L D）の基本特性に関する実験的検討、構造工学論文集、34A、1988年、pp. 603-616.
- 2) 藤野、パチェコ、孫、チャイセリ、磯部：同調液体ダンパーに関する非線形波動シミュレーションとその実験的検証、構造工学論文集、No. 35A、1989年、pp. 561-574.
- 3) 藤野、パチェコ、チャイセリ、孫、古賀：T M D アナロジーをベースにした T L D の特性の理解、構造工学論文集、36A、1990年、pp. 577-590.
- 4) 久保他：液体振動を利用した回転方向振動の制振に関する基礎的研究、44回土木学会年次講演会概要集、1-339、1989. 10、pp. 730-731.
- 5) 小坪、高西、多田：ロッキング振動をする長方形同調液体ダンパーの等価振動系に対する近似式表示、45回土木学会年次講演会概要集、1-472、1990. 10、pp. 974-975.
- 6) 孫利民、藤野陽三：T L D シミュレーションにおける砕波のとりこみ方（準備中）

（1990年10月12日受付）