

数値流体モデルによる同調液体ダンパー (Tuned Liquid Damper, TLD) の減衰性能の予測

建設省 正会員 木村周二
 東京大学 正会員 阿部雅人
 東京大学 フェロー 藤野陽三

1. はじめに 社会基盤施設の振動を制御する手段の一つとして、容器内液体（一般に水）のスロッシング振動を利用した同調液体ダンパー（Tuned Liquid Damper, TLD）がある。TLDは、簡便安価、メンテナンスフリーといった利点を有する反面、水を使用した場合、同調ダンパーとしては減衰が小さく、また比重が小さいため装置が大きくなりがちであるといった欠点がある。そこで、この欠点を解消するために浮遊物や網を用いる、あるいは粘性の高い流体を利用するなどして減衰を高めたり、比重の大きい液体を利用して同体積での効率を向上させた TLD が提案されている。一方、従来の TLD の解析では、Potential 流、つまり、渦無し液体内部の粘性無しという仮定を用いることが多く、これら高減衰化を図った場合の性能予測技術は未だ確立されていない。本研究では、ナビエストークス方程式を直接に差分化することで液体の粘性を考慮に入れた数値解析を行い、高粘性流体を用いた TLD の減衰性能の予測を試みる。

2. 数値解析モデル 本研究では、TLD 容器として矩形容器を考え、解析の際には計算時間の短縮のために振動方向と深さ方向のみの 2 次元問題として扱った。支配方程式は、式 1 から 3 のようにナビエストークス方程式と連続式で表される。また自由表面の記述のために MAC 法（Marker and Cell method）を用い、圧力場の解法としては、SOLA 法を用いた。また、格子は境界適合格子とした。自由表面の移動は、 x のみの関数である水深 η を用いて、式 4 で表される方程式に従う。これらの方程式を差分化し、数値解析を行う。境界条件は、壁面で non slip とし、自由表面上は、空気との摩擦を無視し圧力と表面張力から求める。本研究では、減衰の大きさを問題としているため、数値粘性が小さくなるように、移流項の差分には UTOPIA 法を、その他の差分にも 3 次精度の差分を用い、さらにメッシュの変形による誤差の影響を小さくするために、移流項にメッシュの変形を考慮した補正を加えた。また、収束の打ち切り誤差による液体の量の変化をなくすために、水深の変化は図 1 のように垂直方向に切った短冊状の部分の左端、右端からの流出量と流入量の差から求めることとした。これは、連続式が完全に満たされる場合には式 4 と等価になる。

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{z=\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = w_{z=\eta} \quad (4)$$

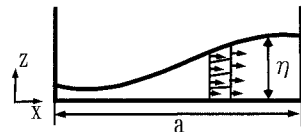


図1 TLD模式図

3. 数値解析および実験結果 はじめに、数値粘性の大きさを確認するために粘性がないケースの解析を行った。正弦波の初期条件をあたえ、自由振動させた。メッシュ数、容器サイズなどは表 1、表 2 の値を用いる。その結果を図 2 に示す。図 2 は TLD 内の流体の持つ力学的エネルギーで、比較のため、水（動粘性係数 $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ ）程度の粘性をもつケースをあわせて示した。粘性がない場合も、数値粘性の影響から減少していくが、そのエネルギー減少から計算される減衰の大きさは、約 0.08% である。これより、本研究における解析結果には 0.08%

キーワード：TLD, 数値解析, 差分法

東京都文京区本郷 7-3-1

程度の数値粘性が含まれると考えられる。また、水の場合は同様に約 0.58% である。この結果から、数値粘性の影響は水の場合でも卓越するものではないが、無視することはできないが、本研究では、高粘性の流体を用いるためその影響は相対的に小さいと考えられる。

本研究では、実験を行い数値解析結果との照合を行った。今回は、TLD を振動台で加振し、液体中に浮遊させた白い粉を観察する可視化実験と、波高を波高計で計測する実験を行った。実験の条件は表 1 のとおりである。液体には不凍液を用い、濃度を变化させることで粘性を調節した。また、解析に用いたメッシュは図 3 のように、境界付近でメッシュを細かくとつたものを用いた。計算条件は表 2 に示す。

解析に先立って行った可視化実験においては、容器端部で渦が発生することが確認されたが、数値解析においても同様に容器端部での渦が再現され、Potential 流の仮定のもとでは再現できない液体の運動を表現することができた。また、波高を計測したスウィープ試験を行い、実験と数値解析の比較を行った。その結果を図 4、5 に示した。図 4 は、動粘性係数を $0.28 \text{ cm}^2/\text{s}$ に固定し、加振振幅を变化させた場合の結果である。また、図 5 は、振動台の加振振幅を 0.12mm に固定し、液体の粘性を变化させた結果である。いずれのケースも数%程度、解析結果が実験結果よりも大きな応答を示している。しかしながら、振幅の変化による減衰の変化や、粘性の変化による減衰の変化量は概ね再現できていると考えられる。また、その違いは 2 次元問題と仮定したため考慮されなかった振動方向と水平な面の影響などがあると考えられる。

4. まとめ 本研究では、液体内部の粘性の影響を考慮した数値解析モデルを作成した。数値解析の結果、可視化実験により観察された渦が再現されることが確認できた。また、スウィープ試験と解析の比較の結果、解析値の応答が大きい、つまり解析による減衰は小さく評価されるものの、その傾向は再現できた。

参考文献 木村周二, 数値流体モデルによる同調液体ダンパー (Tuned Liquid Damper, TLD) の減衰性能の予測, 東京大学修士論文, 1998

謝辞 建設省土木研究所の河原能久主任研究員には多岐にわたる助言をいただきました。ここに謝意を表します。

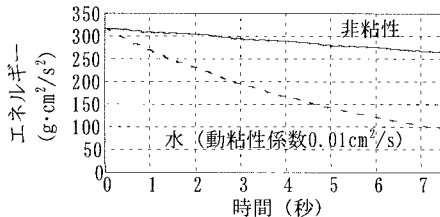


図2 無減衰自由振動時のエネルギー

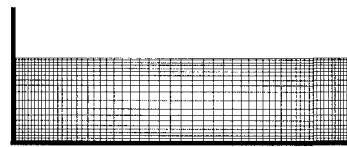


図3 メッシュ分割

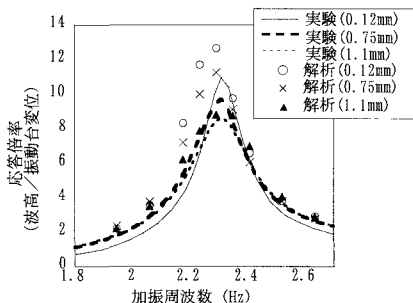


図4 スウィープ試験（粘性一定）

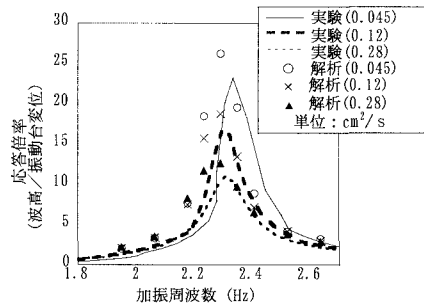


図5 スウィープ試験（加振振幅一定）