

同調液体ダンパーの振動特性に関する研究

Study on Vibration of Tuned Liquid Damper

学籍番号：165709 朱 シン鵬

(主指導教員 張 景耀 准教授 副指導教員 青木 孝義 教授, 尹 奎英 准教授)

1. 序論

建設技術の進歩に伴い、建物の高層化・軽量化が進んでいる。建物が高くなるほど、固有周期が長く、建物全体が柔くなる。また、建物の長周期化に伴い、その減衰が小さくなる傾向がある。特に地震や強風が起きた場合、建物の振動が長く続くことにより、手術室やエレベーターなどの設備が運営停止し、構造要素が損傷するなど様々な被害を起こす可能性が高い。

超高層建物の振動による被害を低減するため、制振装置による揺れの制御が積極的に採用されている。その中で、同調液体ダンパーは製造・設置コストが低い、設計時に取り入れやすい、維持管理が容易、温度などの外的要因の影響が小さいなど多くのメリットが存在するため、広く応用されている。同調液体ダンパーのメカニズムは図1に示される。

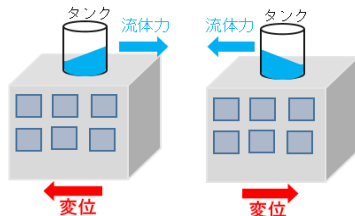


図1 同調液体ダンパーのメカニズム

超高層建物の消防が困難な課題である。2017年6月14日、ロンドンにある24階建ての高層住宅に火災が起きて、70人の死者が出た^[1]。この問題に対して、同調液体ダンパー内の水は日常だけでなく、緊急時にも使用可能となるため、防災上にも役に立てる。

同調液体ダンパーの制振効果を最大限にさせるため、その固有振動数が建物の固有振動数に一致する必要がある。しかし液体の振動は非線形性が強いいため、その固有振動数の設計と制御が容易ではない。また、縮尺模型実験において、液体ダンパーの固有振動数を計測するのも困難である。本研究では、画像処理技術を用いて、図2のようなスロッシングダンパー(TSD)と柱型ダンパー(TLCD)を例として、液体の運動を追跡することを試してみた。計測の結果により、液体ダンパーの固有振動数を推定し、レーザー変位計の計測結

果と比較することで有効性を検証する。また、縮尺模型の自由振動によりTSDとTLCDの振動モードおよび制振効果を振動実験により明らかにする。

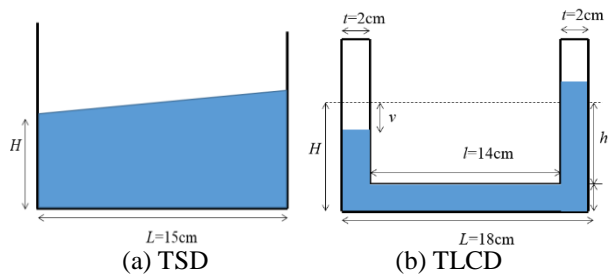


図2 TSDとTLCD

2. 構造模型に関する実験

構造模型はアルミ合金材の5階建て構造物であり、層の幅は20cm、奥行15cm、階の高さは20cm、床の厚みは2cm、模型全体高さは110cmである。

(a) 剛性と質量推定

図3のように、構造模型の各床レベルにそれぞれ4パターンの水平荷重(4.0N、7.6N、11.0N、13.7N)を加えて、レーザー変位計で変位を計測し、構造模型各層の剛性を推定する。また、構造模型の固有振動数と剛性を得たうえで、式(1)のような構造模型の層運動方程式から質量を推定する。ここで、 m は質量、 c は粘性係数、 k は剛性、 $\ddot{\phi}$ は地動加速度である。結果は表1にまとめる。

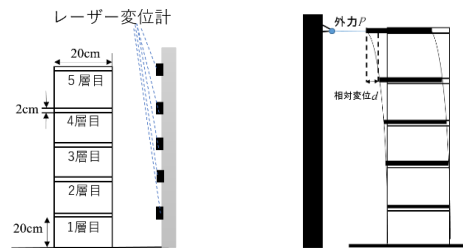


図3 静的実験

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \dot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 = -m_1 \ddot{\phi} \\ m_2 \ddot{y}_2 + (c_2 + c_3) \dot{y}_2 - c_3 \dot{y}_3 + (k_2 + k_3) y_2 - k_3 y_3 = -m_2 \ddot{\phi} \\ m_3 \ddot{y}_3 + (c_3 + c_4) \dot{y}_3 - c_4 \dot{y}_4 + (k_3 + k_4) y_3 - k_4 y_4 = -m_3 \ddot{\phi} \\ m_4 \ddot{y}_4 + (c_4 + c_5) \dot{y}_4 - c_5 \dot{y}_5 + (k_4 + k_5) y_4 - k_5 y_5 = -m_4 \ddot{\phi} \\ m_5 \ddot{y}_5 + c_5 \dot{y}_5 - k_5 y_5 = -m_5 \ddot{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表 1 層剛性と層質量推定値

層	質量	剛性
1層目	1.5kg	8.3259kN/mm
2層目	1.5kg	8.8142kN/mm
3層目	1.5kg	8.6199kN/mm
4層目	1.5kg	9.1079kN/mm
5層目	1.48kg	8.5261kN/mm

(b) 画像処理の有効性

本研究では解析ソフト LabVIEW の Vision Assistant^[2] オプションを用いて、床レベル及び液体の変位を計測する。基本的な流れとして、まず、実験の動画を高速カメラにより撮る。次は撮った動画をフレームに分割する。次は図 4 に示すように、フレーム写真の解像度を合わせて、境界の所にエッジを付ける。最後はエッジの運動を追跡し、変位に変換することにより、固有振動数を求める。

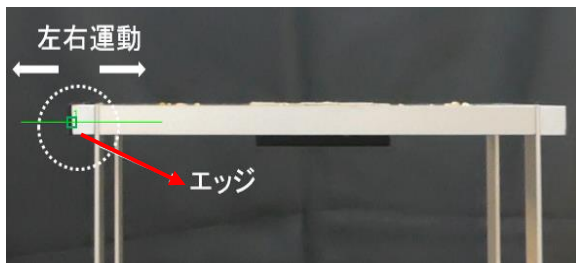


図 4 構造模型の画像処理

画像処理の有効性を検証するため、レーザー変位計と高速カメラを用いて構造模型の自由振動における変位を計測する。また、画像処理において、構造模型の幅は 1118 ピクセルであり、実際の幅は 20cm であるため、1 ピクセルは 0.01788cm に相当する。図 5 は 5 階天井における 30 秒間の変位を示している。図 5 に示すように、レーザー変位計で計測した変位と画像処理から得られた変位は概ね一致している。

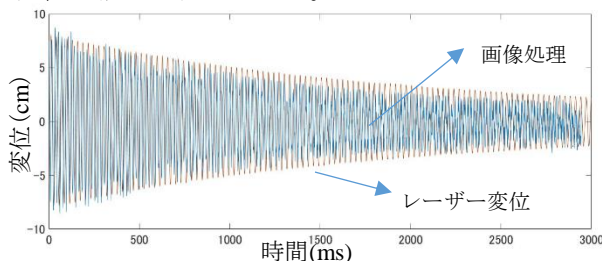


図 5 5 層目床レベル変位の比較

また、図 6 に示すように、レーザー変位計で得られた構造模型の変位から固有振動数を推定する。画像処理の結果と比較により、画像処理技術は有効であることを確認した。

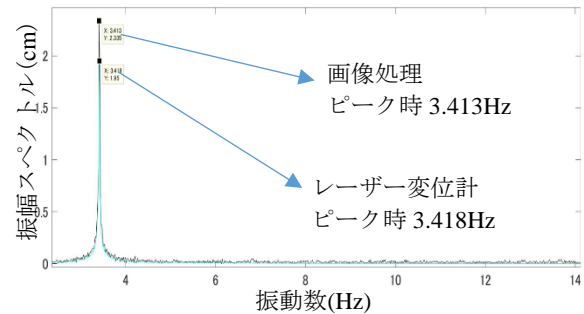


図 6 固有振動数の比較

3. TSD に関する実験

本研究に用いられる TSD の寸法は図 2 (a) に示されるように、アクリル板制で横幅は 15cm である。

(a) TSD の固有振動数

TSD の固有振動数の理論値は数値解析^[3]の方法から、式(3)で計算できる。 L は矩形ダンパーの長さ、 n はモード、 H は水の深さとする。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1)\pi g}{L} \cdot \tanh \frac{(2n-1)\pi H}{L}} \quad (3)$$

理論値の有効性を検証するため、図 7 のような長方形ダンパー単体内の液体の自由振動実験を行った。幅は 15cm を矩形ダンパーを利用し、深さ 2cm、3cm、4cm、5cm、6cm の水を注ぎ、画像処理によりそれぞれの固有振動数を推定する。固有振動数の推定結果は表 2 にまとめるように、理論値と実験値は概ね一致である。これで TSD に関する数値解析の有効性を検証できた。

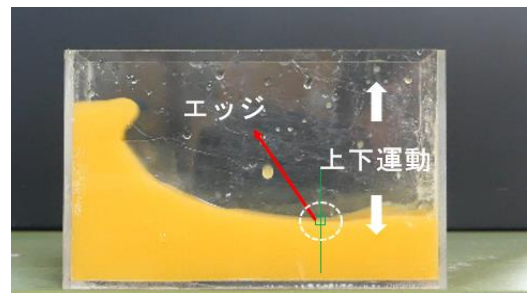


図 7 画像処理における TSD のフレーム写真

表 2 TSD の固有振動数の理論値と実験値比較

	理論値(Hz)	実験値(Hz)
$H=0.02\text{m}$	1.499	1.523
$H=0.03\text{m}$	1.721	1.758
$H=0.04\text{m}$	1.889	1.934
$H=0.05\text{m}$	2.011	1.992
$H=0.06\text{m}$	2.103	2.109

(b) TSD と構造模型の連成系

自由振動実験により、長方形ダンパーを構造模型に載せた場合の固有振動数を推定する。この場合は二つの考え方に分けられる。一つ目は図 8(a)に示すように、矩形ダンパーを付加質量として考える、二つ目は図 8(b)を示すように、TSD をさらに 1 層として考える。

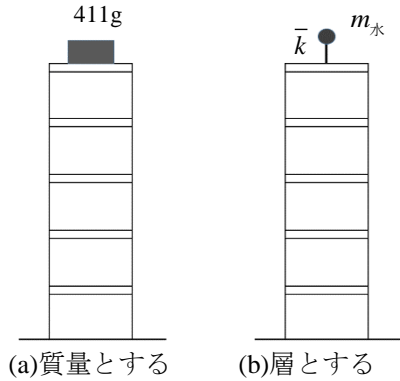


図 8 ダンパーと構造模型の連成系

まず図 8(a)の場合を考える。矩形ダンパーの水が 3cm であり、ダンパーと水の全体質量は 411g である。模型最上層の質量に合わせて 1.891kg となる。式(3)によると、その一次固有振動数は 3.28Hz である。

また、図 9 に示すようにレーザー変位計と画像処理から推定された固有振動数はそれぞれ 3.235Hz と 3.237Hz である。理論式の結果(3.28Hz)と比較すると、よく一致することがわかる。

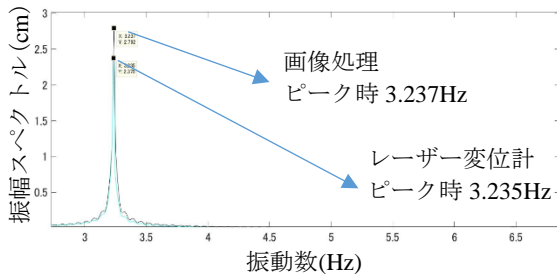


図 9 TSD を質量とする場合の解析結果比較

次は図 8(b)の場合を考える。まず、液体の質量を体積と密度から計算し、固有振動数の推定値と質量から液体の擬似剛性 \bar{k} を求める。液体の深さが 3cm の場合、その質量が 225g となる、その固有振動数については表 2 を参考する。一次自由度系として液体の擬似剛性が式(5)のように計算される。また、連成系の剛性マトリックスは式(4)になる。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + \bar{k} & -\bar{k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{k} & \bar{k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{k} = (2\pi \cdot f_{\text{水}})^2 m_{\text{水}} = 27.1 \text{N/m} \quad (5)$$

各層の剛性を代入して固有振動数を計算する。表 3 には 6 次までの固有振動数をまとめている。

表 3 TSD 連成系の固有振動数理論値 (Hz)

1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
1.58	3.39	9.90	15.58	20.34	23.35

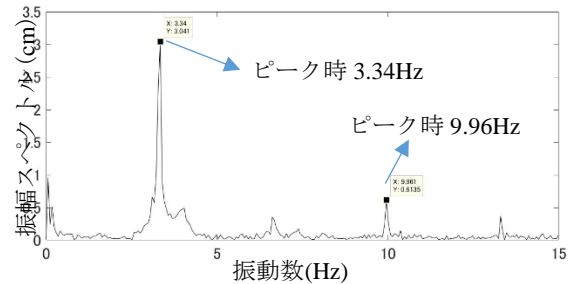


図 10 液体深さ 3cm 場合の TSD の固有振動数

TSD の固有振動数は画像処理により推定される。図 10 からわかるように、主要モード値は 3.34Hz、次のピーク値は 9.96Hz である。それぞれ表 3 の 2 次モードと 3 次モードの値に対応している。

4. TLCD に関する実験

本研究に用いられる TLCD の寸法は図 2 (b)に示されるように、アクリル板制で横幅は 18cm、柱の幅は 2cm である。

(a) TLCD の固有振動数

TLCD の固有振動数は理論式(6)から計算する。 H は液体面高さ、 t は柱の幅、 L は TLCD の幅である。^[4]

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{2H - 2t + L}} \quad (6)$$

また、図 11 のように画像処理を用いて、TLCD の液体の自由振動実験を行った。幅は 18cm の TLCD に液体面高さ 2cm、3cm、4cm、5cm、6cm の水を注ぎ、固有振動数を推定する。固有振動数の推定結果は表 4 にまとめるように、理論値と実験値概ね一致である。これで TLCD の固有振動数に関する理論値の有効性を検証できた。

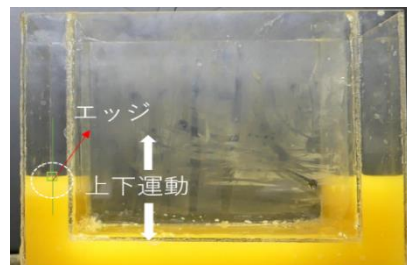


図 11 画像処理における TLCD のフレーム写真

表 4 TLCD の理論値と実験値比較

	理論値 (Hz)	実験値 (Hz)
$H=0.02\text{m}$	1.676	1.641
$H=0.03\text{m}$	1.515	1.523
$H=0.04\text{m}$	1.421	1.406
$H=0.05\text{m}$	1.381	1.386
$H=0.06\text{m}$	1.338	1.348

(b) TLCD と構造模型の連成系

TSD と同じように二つの考え方に分ける。まずは付加質量として考える。柱型ダンパーの自重は 344g である。中の液体の深さは 3cm の場合を考える。液体の質量は 372g である。構造模型最上階床の質量に合わせると、2.196kg となる。式(5)によると、一次固有振動数は 3.21Hz である。またレーザー変位計と画像処理から計算された一次固有振動数を図 12 に示されるように、固有振動数はそれぞれ 3.252Hz と 3.271Hz である。理論式の結果(3.21Hz)と比較すると、よく一致することがわかる。

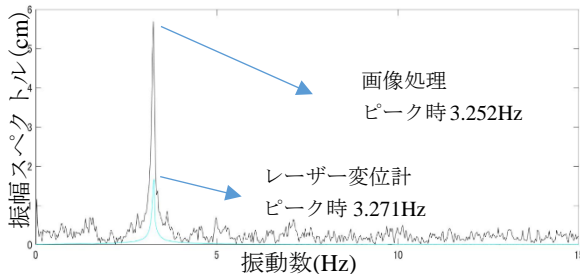


図 12 質量とする場合の TLCD 解析結果比較

次は TLCD を層として考える。液体深さ 3cm の場合質量は 372g である。固有振動数は表 4 を参考し、式(5)から液体の擬似剛性を計算する。式(4)に代入し、数値解析から得られた固有振動数は表 5 にまとめる。

表 4 固有値解析により固有振動数まとめ(Hz)

1次	2次	3次	4次	5次	6次
1.50	3.27	9.76	15.43	20.26	23.32

TLCD の固有振動数は画像処理により推定される。図 13 からわかるように、主要モード値は 3.27Hz である。表 3 の 2 次モードの値に対応している。

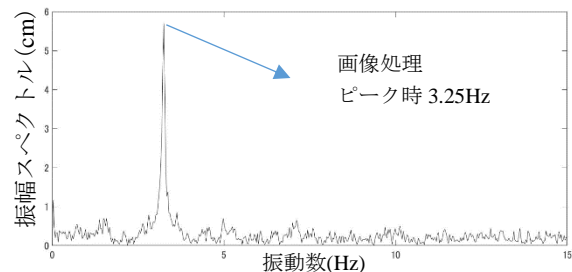


図 13 液体深さ 3cm 場合 TLCD の固有振動数

(c) TSD と TLCD の制振特性

TSD と TLCD の制振効果を比較するため、同じ固有振動数を設置する必要がある。表 2 と表 4 を参考にして、液体深さ 2cm の TSD と液体深さ 3cm の TLCD の固有振動数がほぼ一致である。また、制振効果を最大にするため、構造模型の 2 階床を取り出して、3 階床に質量を付加するにより、構造模型の固有振動数を 1.52Hz までに抑える。TSD と TLCD をそれぞれ構造模型に載せて、初期変位が大きい場合(図 14)と初期変位小さい場合(図 15)の自由振動実験を行う。

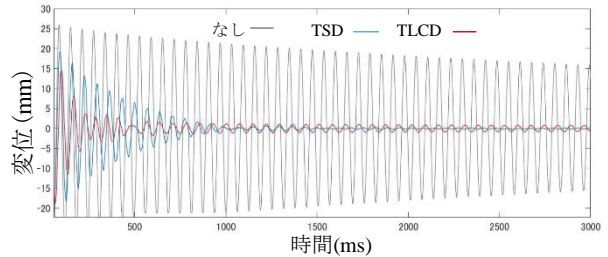


図 14 初期変位大きい場合の自由振動変位図

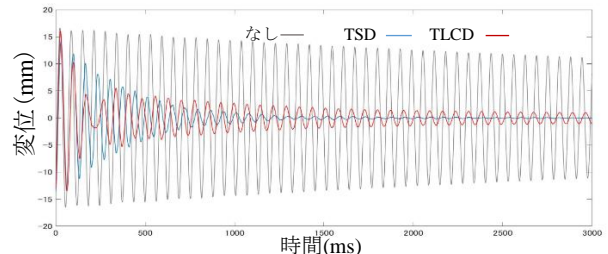


図 15 初期変位小さい場合の自由振動変位図

図 14 と図 15 からわかるように、初期変位大きい場合、TLCD は振幅を早く抑えるが、微小振動が長く続く。一方、TSD は初期変位に関係なく、振幅を完全停止まで徐々に抑えられる。

5. まとめ

本研究は画像処理技術を用いて実験を行った。まず、構造模型における、レーザー変位計で測定された結果と比較により、画像処理技術は同調液体ダンパーに対して有効な実験手法であることを示した。次は TSD と TLCD の理論式から得られた固有振動数と画像処理で測定した固有振動数を比較により、理論式の有効性を証明した。

TSD と TLCD の構造模型との連成系について、自由振動実験を行い、固有振動数の変化や振動モードを明らかにした。また、比較実験により、TSD と TLCD の制振特性を確認できた。

6. 参考文献

- 「ロンドン火災、大規模改修が被害を拡大」日経アーキテクチャ web 版, 2017 年 7 月 5 日
- 橋本 岳, LabVIEW 画像計測入門, 講談社, 2011 年
- 小松 敬治, 液面振動とタンクの振動, 森北出版会社, 2015 年
- Peter Andrew Hitchcock, Vibration Control of Structures by Liquid Column Vibration Absorber, Ph.D.Thesis, University of Sydney, 1996

