消波材を用いた TLD (Tuned Liquid Damper)の実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON TUNED LIQUID DAMPER USING WAVE ABSORBER

佐々木 淳 — *1
塩崎 洋一 — *2
長谷部 廣行 — *3
武内 義夫 — *4

Atsushi SASAKI
Yoichi SHIOZAKI
Hiroyuki HASEBE
Yoshio TAKEUCHI

This is a study of Tuned Liquid Damper (TLD) which reduce vibration in strong wind of long period structures such as high-rise buildings and tall towers.

This paper discussed that experiment of Tuned Liquid Damper (TLD), which was the basic characteristics of circular type TLD using wave absorber.

The result that the maximum displacement responses under the steady state simple harmonic excitation decreased to approximately 45% to 70%.

キーワード：
同調液体ダンパー, 振動抑制, 消波材

Keywords:
tuned liquid damper, vibration control, wave absorber

1 はじめに

超高層建築物や塔状構造物は固有周期が長く、構造減衰が小さいため、地震や風等によって揺れ易く、この揺れが居住性能の低下などの問題を引き起こしている。このような振動を低減させる方法の一つに構造物に制振装置を設置する方法があり、近年盛んに研究されている。

液体のスロッシング現象を利用する制振装置 TLD (Tuned Liquid Damper) は、固体質量を用いる制振装置 TMD (Tuned Mass Damper) と比較して、設置が容易であることや、微小振動から効果を発揮するなどの利点を有しており、国内でも既にいくつかの実構造物に設置されている^{1),2)}。

しかしながら、液体に水を用いる場合、水は液面動揺の減衰が小さいため、一般的に TMD などでは用いられる最適な減衰定数に満たない場合が多い。そのため液体表面に浮遊物を浮かべる方法³⁾や、装置内にネットを設置する方法⁴⁾など、減衰性能を向上させる試みがなされている。

著者らはスロッシング運動の1次モードの挙動が一番大きくなる容器の壁面近傍に着目し、波浪造波水槽内に反射波を軽減させるために用いられている消波材を容器壁面に設置することで、TLDの減衰性能をより向上させることができると考えた。

本研究では、円筒容器の TLD の壁面に消波材を設置した場合の効果について実験的に検討した。

2 実験方法

2.1 TLD の緒元

本実験で使用した TLD 容器は、図1および写真1に示すような円筒容器である。容器の外径 D は 80 cm であり、透明なアクリル樹脂で作成した。また容器内の液体の減衰性能を高めるため、図1および写真1に示すように、容器内の壁面にポリプロピレン製の網状の骨格体 (品名:ヘチマロン、空隙率 80~90%、以下、消波材) を設置した。消波材の厚さ B は 3 cm (ヘチマロン# 230)、5 cm (ヘチマロン# 350)、8 cm (ヘチマロン# 230 と # 350 を組み合わせたもの) の3種類である。したがって本実験で使用した容器は消波材を設置しない場合を含めて合計4種類である。なお、本実験で用いた容器内の液体は水道水であり、粘性の増加等は行っていない。

ここでは対象とする実構造物の1次固有振動数を 0.5 Hz と想定していることから、TLD 内の固有振動数 f_d をこれと同調させるように 0.4~0.6 Hz の間で変化させた。TLD 内の水の固有振動数 f_d はポテンシャル理論⁵⁾に基づき計算した。なお、TLD 内の水の固有振動数 f_d が 0.5 Hz の場合の水深は 49 mm であり、水の質量は 2.49 kg である。また消波材を設置した場合については、その影響を無視し、消波材を設置していない場合と同じ値を用いることとした。

2.2 実験装置

本実験では実構造物のモデルとして、図2に示すような、固有振動数 f_s の1自由度系と考えられる振動体 (以下、建物モデル) を用いた。建物モデルは、実構造物の質量に相当するフレームを4本の PC 鋼棒で吊り、フレームが一方方向のみに振動するように、一端が床に固定されているリン青銅の板バネをフレームの側面に取り付け

*1 西松建設技術研究所 工修
*2 西松建設技術研究所 工修
*3 西松建設技術研究所 主任研究員
*4 西松建設技術研究所 主任研究員・工修

*1 Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd., M. Eng.
*2 Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd., M. Eng.
*3 Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
*4 Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd., M. Eng.

写真1 TLDの容器形状

図1 TLDの容器形状

図2 建物モデル

(a) TLD未設置

(b) 消波材なし

(c) 消波材の厚さ B=3cm

(d) 消波材の厚さ B=5cm

(e) 消波材の厚さ B=8cm

図3 自由振動波形の一例(初期変位 $X_0=1$ mm)

なお、ここでは質量比 μ の影響を考慮するため、質量比 $\mu=1\%$ の場合が基準になるように分子に $100 \times \mu$ を掛けることとする。

(1) 自由振動波形

初期変位 $X_0=1$ mm の場合の自由振動波形の一例を図3に示す。TLDを設置していない場合と比較すると、TLDを設置した場合はいずれも制振効果が認められる。消波材に注目すると、消波材を設置していない場合はビート状の揺れ戻しが生じるのに対して、消波材を設置した場合は揺れ戻しが小さく、また消波材の厚さ B が厚くなるに従って揺れ戻しが減少する。これより消波材を設置すること

た。

本実験では実構造物の1次固有振動数を0.5 Hzと想定していることから、建物モデルの固有振動数 f_s を0.5 Hzとなるように調整した。また建物モデルの質量 M_s は、TLD内の水の質量 M_b と建物モデルの質量 M_s との比 $\mu (=M_b/M_s, \text{質量比})$ が1%前後となるように重りを載せて調整した。

建物モデルのみの減衰定数 ζ_s は、フレームと板バネとの接合部で摩擦が生じてしまい、初期変位 X_0 や建物モデルの質量 M_s の違いによって若干異なる。本実験で行った減衰定数 ζ_s の範囲は、建物モデルのみで0.3~1.3%程度の範囲であった。

2.3 自由振動実験

自由振動実験は、図2に示すように、先ず針金の先端に重りを付け、振動方向に所定の初期変位 X_0 を与える。そして針金を切断することにより建物モデルを自由振動させ、レーザー変位計でその変位を測定した。初期変位 X_0 は1, 2, 5 mmの3種類である。

2.4 強制振動実験

自由振動実験の結果より、各容器ごとに制振効果の高いと思われるTLD内の水の固有振動数 f_b について、図2に示すように、一方向にのみ正弦波加振ができる起振機を建物モデルに取り付け、強制振動実験を行った。加振振動数は0.4~0.6 Hzの範囲で変化させた。また加振振幅は、TLDを設置していない場合の共振状態で5 mmの応答となるように設定した。

3 結果と考察

3.1 自由振動実験

自由振動実験におけるTLDの制振効果を評価する指標として、文献3)と同様の方法を用いて、振動開始後約82秒間(サンプリング時間間隔 $\Delta t=0.02$ sec, サンプリング個数4096)の応答変位のrms値を用いて、(1)式のような無次元パラメータ σ^* (rms比) を定義する。

$$\sigma^* = \frac{\text{TLDを設置した場合のrms値} \times 100 \times \mu}{\text{TLDを設置していない場合のrms値}} \dots\dots (1)$$

図4 初期変位 X_0 の違いによる振動数比 f^* と rms 比 σ^* の関係

によって、TLD内の水のエネルギーの消散効率が向上することがわかる。

(2) 振動数比 f^* の影響

初期変位 X_0 の違いによる消波材を設置していない場合の TLD 内の水の固有振動数 f_0 と建物モデルの固有振動数 f_s との比 f^* ($=f_0/f_s$, 振動数比) と rms 比 σ^* の関係を図4に示す。なお、消波材を設置した場合の TLD 内の水の固有振動数 f_0 については、消波材を設置した状態での固有振動数の測定を行っていないため、消波材を設置していない場合の同水量の値を用いることとした。各パラメータで振動数比 f^* が1より小さいときに rms 比 σ^* の最小値 $\sigma_{\min}^*$ (最小 rms 比) は生じており、既往の研究³⁾での TLD の性状と一致する。また消波材を設置した場合、設置していない場合よりも振動数比 f^* が小さいところで最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ が生じている。

(3) 初期変位 X_0 の影響

図4を見ると、消波材の厚さ B が8 cm の場合を除いて、初期変位 X_0 の違いによる最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ の明瞭な差異は見られず、最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ は50%程度であった。また初期変位 X_0 が増加するに従って、最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ が生じる振動数比 f^* が若干大きくなる傾向がある。

消波材の厚さ B が8 cm の場合に注目すると、初期変位 X_0 が増加するに従って最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ が大きくなり、制振効果は若干減少するものの、振動数比 f^* の違いによる差異が明瞭でなくなり、広い周波数範囲において、rms 比 σ^* で60%程度の制振効果が得られることがわかった。これは初期変位 X_0 が増加するに従って消波材に接触する水量が増え、減衰性能が向上し、一般的に TMD などを用いられる最適な減衰定数に近づいたためと考えられる。

(4) 消波材の影響

初期変位 $X_0=5$ mm の場合の消波材の厚さ B の違いによる振動数比 f^* と rms 比 σ^* の関係を図5に示す。消波材を設置した場合、

図5 消波材の厚さ B の違いによる振動数比 f^* と rms 比 σ^* の関係(初期変位 $X_0=5$ mm)

設置していない場合よりも若干制振効果が低下するものの、振動数比 f^* の違いによる差異が小さくなる。

消波材の厚さ B に注目すると、最小 rms 比 $\sigma_{\min}^*$ は消波材の厚さ B が $B=5$ cm の場合が最も小さく、消波材の厚さ B を増加しすぎると TLD の制振効果が若干低下することがわかった。しかしながら、振動数比 f^* の違いによる差異が明瞭でなくなり、広い周波数範囲において、安定した制振効果が得られることがわかった。これは初期振幅の影響の場合と同様に、消波材の厚さ B が増加するに従って消波材に接触する水量が増え、減衰性能が向上し、最適な減衰定数に近づいたためと考えられる。

3.2 強制振動実験

強制振動実験で得られた建物モデルの変位の周波数応答をプロットしたものを図6に示す。これらの結果に基づいて、TLD を TMD にモデル化するため、文献3)と同様の方法を用いて、TMD に置換した場合の質量 M_M 、振動数 f_M 、減衰定数 ζ_M をパラメータとして、

図6 TMDモデルによるカーブフィッティング

表 1 最適にフィッティングした TMD モデルの諸元

外 径 D (mm)	消波材の 厚さ B (mm)	TLD 内の水の 質量 M_D (kg)	建物モデルの 質量 M_S (kg)	建物モデルの 振動数 f_S (Hz)	TMD モデルの 振動数 f_M (Hz)	TMD モデルの 減衰定数 ζ_M (%)	有効質量比 μ^* (%)	TMD モデルの 質量 M_M (kg)	M_M/M_S (%)
800	0 (なし)	2.35	232.05	0.487	0.494	1.50	80.0	1.88	0.809
800	30	2.24	193.07	0.494	0.492	2.77	50.0	1.12	0.580
800	50	2.24	232.05	0.496	0.492	2.73	40.0	0.90	0.386
800	80	2.05	196.40	0.492	0.489	3.02	26.0	0.533	0.272

図 7 消波材の厚さ B と減衰定数 ζ_M および有効質量比 μ^* の関係 図 8 M_M/M_S と TMD モデルの減衰定数 ζ_M の関係

TMD モデルの理論解へのカーブフィッティングを行った。図中の実線は実験値へカーブフィッティングした結果であり、点線は TLD を設置していない場合の理論解である。表 1 に最も良く適合した TMD モデルの諸元を示す。ただし、カーブフィッティングの際、建物モデルの固有振動数 f_D は強制振動実験の途中で変化していることも予想されるため、 $\pm 5\%$ の範囲で変化させることを容認した。また TMD モデルの質量 M_M と TLD 内の水の質量 M_D との比 $\mu^* (=M_M/M_D, \text{有効質量比})$ の上限については、消波材を設置した場合は 100% とし、消波材を設置していない場合は既往の研究成果³⁾ を参考にし 80% とした。

カーブフィッティングした結果は、高周波数側で適合性が若干悪いが、ピーク付近では比較的良好に一致している。TLD を載せた場合、変位の周波数応答は加振振動数と TMD モデルの振動数 f_M との比が 1 付近で小さくなっている。消波材を設置していない場合、建物モデルの最大応答は 45% 程度低減している。また消波材を設置した場合、建物モデルの最大応答は 50~70% 程度低減しており、消波材を設置することでより建物モデルの応答を抑制できることがわかる。

消波材の厚さ B と TMD モデルの減衰定数 ζ_M および有効質量

比 μ^* の関係を図 7 に示す。TMD モデルの減衰定数 ζ_M は、消波材の厚さ B を厚くすることにより、減衰性能が向上していることがわかる。しかし、有効質量比 μ^* は、消波材の厚さ B を厚くすることにより、減少してしまうことがわかった。

M_M/M_S と TMD モデルの減衰定数 ζ_M の関係を図 8 に示す。なお、図中には M_M/M_S から得られる TMD モデルの最適減衰定数の値も併記した⁶⁾。消波材を設置することによって、TMD モデルの最適減衰定数に近づく傾向があり、特に消波材の厚さ B が最も厚い $B=8 \text{ cm}$ の値が TMD モデルの最適減衰定数の値にほぼ一致していることがわかる。

4 まとめ

本論文では、スロッシング運動の 1 次モードの挙動が一番大きな容器の壁面近傍に着目し、波浪造波水槽内に反射波を軽減させるために用いられている消波材を容器壁面に設置することで、TLD の減衰性能をより向上させることができると考え、容器の壁面に消波材を設置した場合の円筒容器の TLD の基本的特性について実験的に検討した。その結果、TLD を設置することによって、実構造物を想定したモデルの、正弦波加振時の最大応答変位を 45~70% 程度低減できることがわかった。また消波材の影響については、消波材の厚さを増加させることによって TLD 内の水の減衰性能が向上することや、有効に作用する水の質量が低下すること等が明らかになった。

参考文献

- 1) 田村幸雄, 小杉美樹夫, 西村 功: 空港管制塔の風による応答 (その 1 強風時の挙動), 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿) 構造 I, pp. 1479~1480, 1987
- 2) 大築民夫, 若原敏裕, 日比一喜: 風応答観測に基づく Tuned Liquid Damper の制振効果, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東) 構造 I, pp. 699~700, 1993
- 3) Tamura, Y., Kousaka, R., V. J. Modi: Practical Application of Nutation Dampers for Suppressing Wind-Induced Vibrations of Airport Towers, ICWE, report 8~13, 1991
- 4) 野路利幸, 文見栄司, 吉田英敏, 山中久幸, 小坂英之: スロッシングを利用した制振装置の研究 (その 12) 装置-構造物連成モデルの振動実験概要, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国) 構造 I, pp. 905~906, 1990
- 5) Lamb, H.: Hydrodynamics, Dover Publications, Inc., New York, 1976
- 6) 中嶋一夫, 木下勝弘, 山口伸夫: 受動型制振装置による高層建物の振動制御, 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿) 構造 I, pp. 907~908, 1987

[1995 年 6 月 30 日原稿受理 1995 年 8 月 25 日採用決定]