

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*
Atsushi Sasaki

塩崎 洋一**
Yoichi Shiozaki

武内 義夫*
Yoshio Takeuchi

長谷部 廣行**
Hiroyuki Hasebe

小林 康之*
Yasuyuki Kobayashi

阿世賀 宏***
Hiroshi Asega

要 約

高層建造物の風揺れに等による居住性能の低下などの問題に対し、それらを解消するため、液体を使った制振装置TLD (Tuned Liquid Damper) の開発を行った。本報では容器壁面に消波材を設置し円筒容器のTLDについて、その基本特性を実験的に検討した。その結果、実験構造物を想定したモデルにTLDを設置することにより、正弦波加振実験において、最大応答変位を45～70%程度に低減させることができること等が明らかになった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験方法
- § 3. 結果と考察
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

都市地域などにおいては、土地の高度有効利用などの目的から超高層建造物の建設が盛んに行われている。こ

れらの構造物は固有周期が長く、また構造減衰が小さいため、地震や風などによって揺れ易く、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。このような問題を解消する方法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。

それら制振装置のひとつであるTLD (Tuned Liquid Damper) は、液体のスロッシング (液面動揺) 現象を利用したもので、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、微小振幅から効果を発揮するなどの利点を有しており、国内でも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などで用いられる

* 技術研究所先端技術研究課

** 技術研究所構造研究課

*** 技術研究所研究部

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, これまでの方法よりもTLDの減衰性能を向上させることができると考えた。本報では, 円筒容器のTLDの容器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(容器の内法)Dは80cm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%, 消波材)を設置した。消波材の厚さBは3cm(ヘチマロン#230), 5cm(ヘチマロン#350), 8cm(ヘチマロン

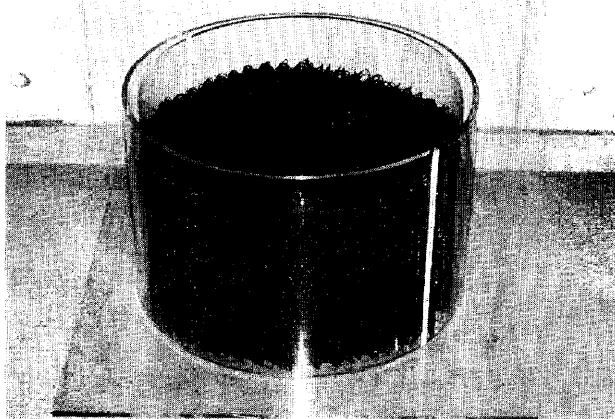


写真-1 TLDの容器形状

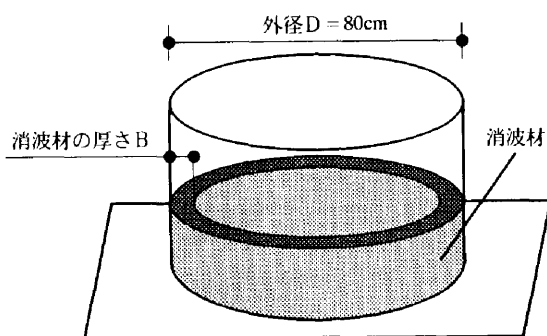


図-1 TLDの容器形状

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0.5Hzと想定し, TLD内の水の固有振動数 f_D をこれと同調させるように0.4~0.6Hz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。ちなみに, TLD内の水の固有振動数 f_D が0.5Hzの場合の水深は4.9cmであり, 水の質量は2.49kgである。なお, 消波材を設置した場合のTLD内の水の固有振動数 f_D については, その状態での容器内の水のスロッシングの固有振動数の計測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。

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(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た。

前述のように, 本実験では実構造物の1次固有振動数を0.5Hz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0.5Hz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_D と建物モデルの質量 M_s との比 $\mu (=M_D/M_s, \text{質量比})$ 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 によって若干異なる。本実験で行った減衰定

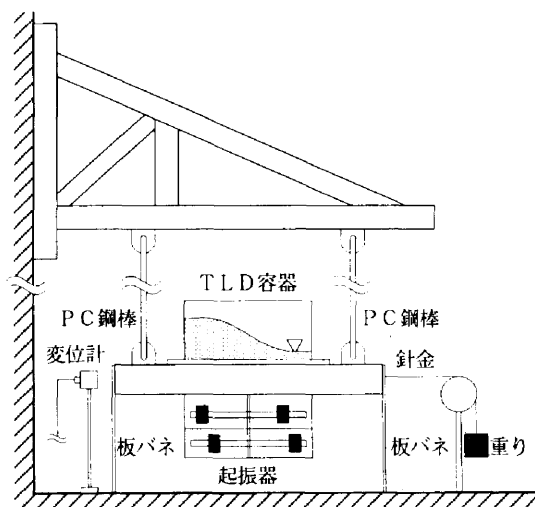


図-2 建物モデル

数 ζ_s の範囲は0.3~1.3%程度である。

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と思われるTLD内の水の固有振動数 f_D 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0.4~0.6Hz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 $\Delta t=0.02\text{sec}$ 、サンプリング個数4092)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。

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

なお、ここでは質量比 μ の影響を考慮するため、質量比 μ が1%の場合を基準になるように、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 $X_0=1\text{ mm}$ 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_D と建物モデルの固有振動数 f_s との比 f^* ($=f_D/f_s$, 振動数比)と rms 比 σ^* の関係を図-4に示す。なお、前述のように消波材を設置した場合のTLD内の水の固有振動数 f_D 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 σ^*_{\min} (最小 rms 比)は生じており、既往の研究成果³⁾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 σ^*_{\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 σ^*_{\min} の明瞭な差異は見られず、最小 rms 比 σ^*_{\min} は50%程度である。また初期変位 X_0 が増加するに従って最小 rms 比 σ^*_{\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の場合に着目すると、初期変位 X_0 が増加するに従って最小 rms 比 σ^*_{\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、広い周波数範囲で rms 比 $\sigma^*=$

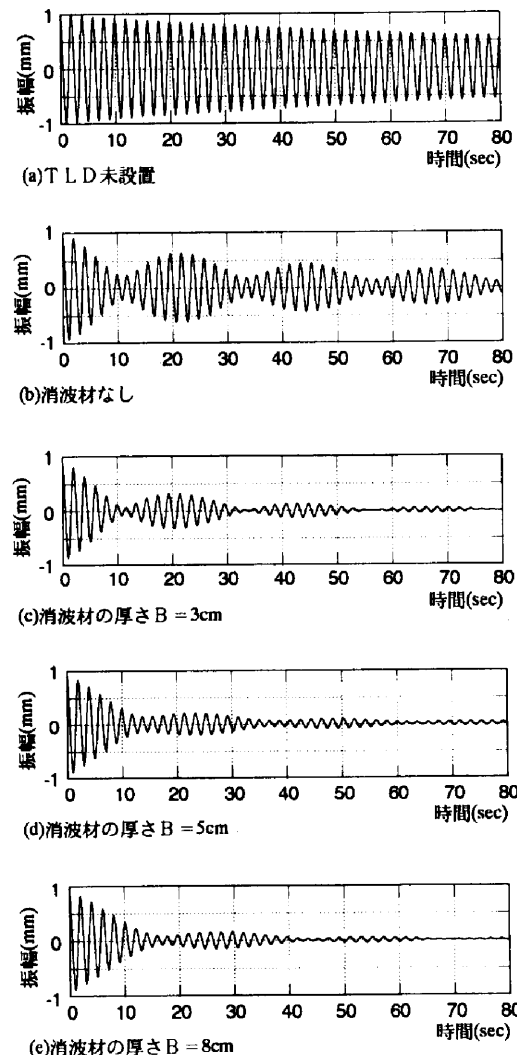
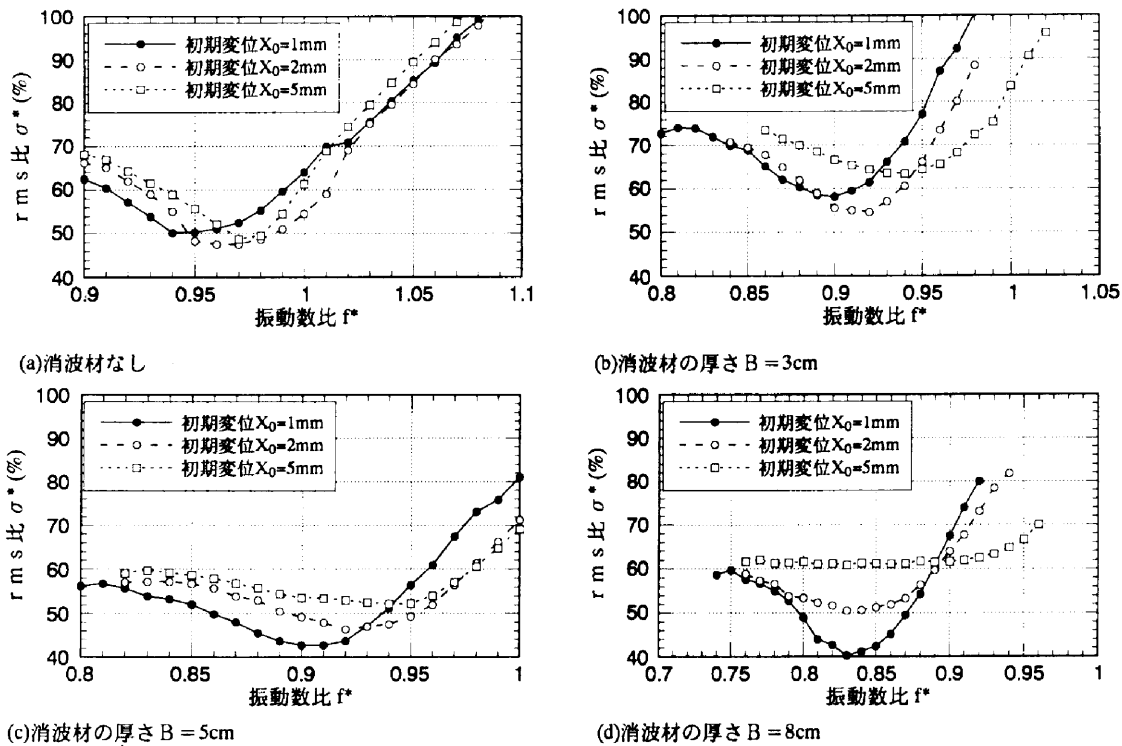


図-3 自由振動波形の一例(初期変位 $X_0=1\text{ mm}$)



図一四 初期変位 X_0 の違いによる振動数比 f^* と rms 比 σ^*

60%程度の制振効果が得られることがわかる。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などで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。

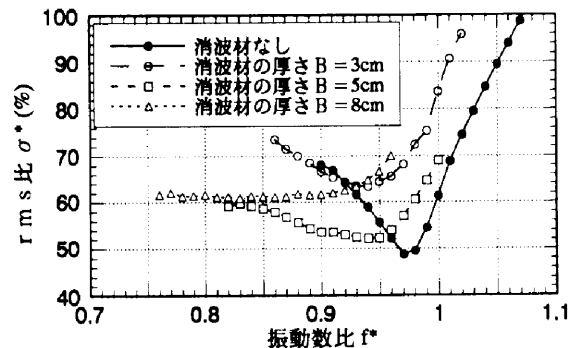
(4) 消波材の影響

初期変位 $X_0 = 5\text{ mm}$ 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^* の関係を図一五に示す。消波材を設置した場合、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 σ^*_{min} は消波材の厚さ B が $B = 5\text{ cm}$ 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る。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、広い周波数範囲で安定した制振効果が得られることがわかる。これは初期振幅の影響の場合と同様、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

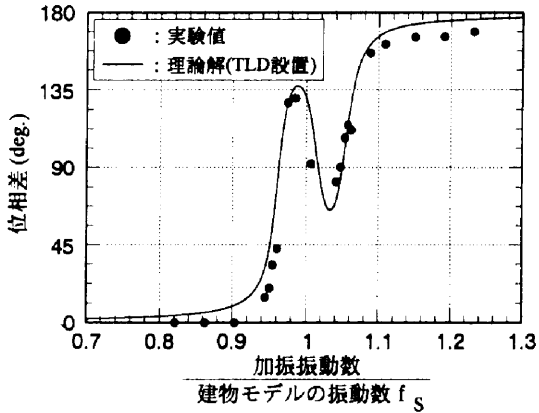
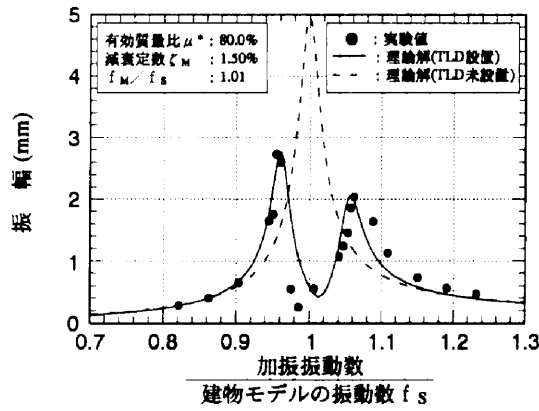
強制振動実験実験で得られた建物モデルの変位の周波数応答をプロットしたものを図一六に示す。これらの結果に基づいて、TLDをTMDにモデル化するため、文献³⁾と同様の方法を用いて、TMDに置換した場合の質量 M_M 、振動数 f_M 、減衰定数 ζ_M をパラメータとして、TMDモデ



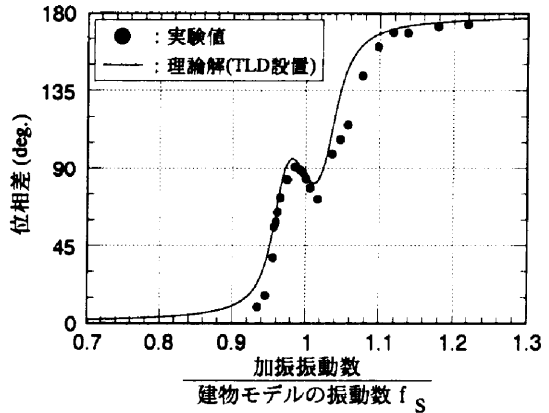
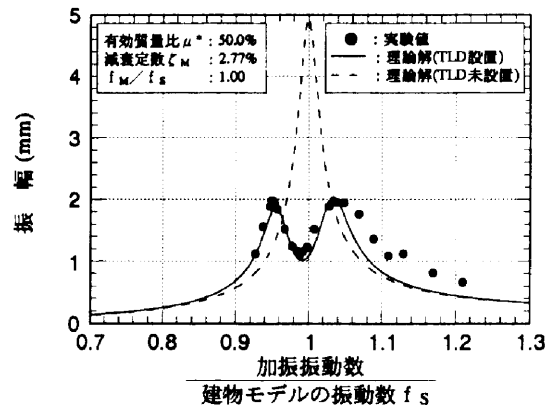
図一五 消波材の厚さ B の違いによる振動波数比 f^* と rms 比 σ^* の関係 (初期変位 $X_0 = 5\text{ mm}$)

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。表一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 μ^* ($=M_M/M_D$, 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。

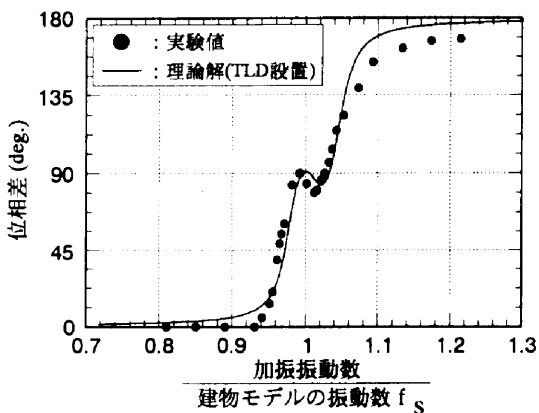
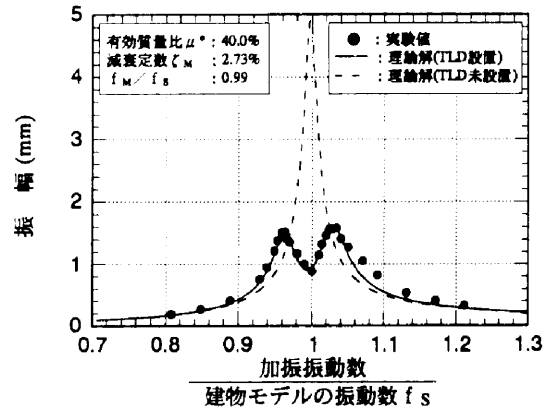
カーブフィッティングした結果は、高周波数側で適合性が若干悪いが、ピーク付近では比較的よく一致してい



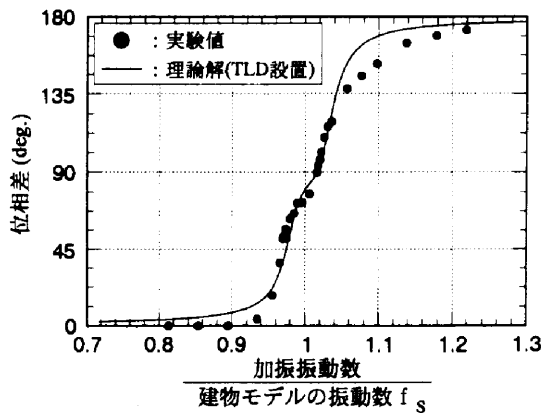
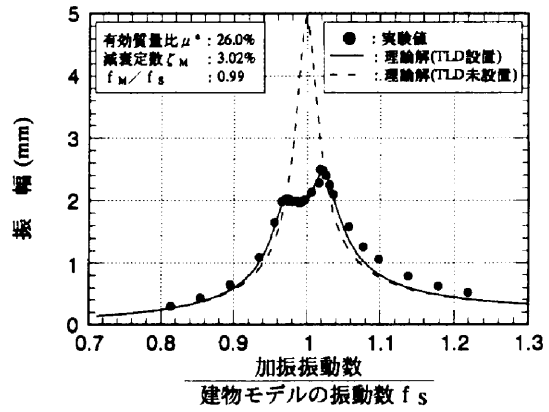
(a)消波材なし



(b)消波材の厚さ B = 3cm



(c)消波材の厚さ B = 5cm



(d)消波材の厚さ B = 8cm

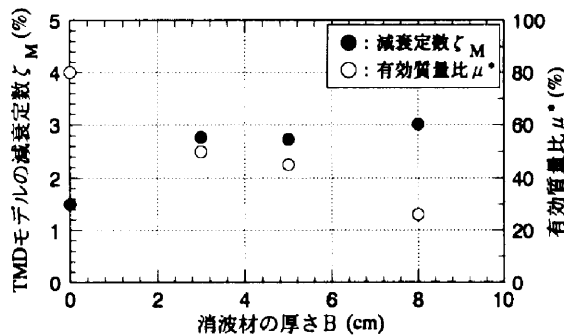
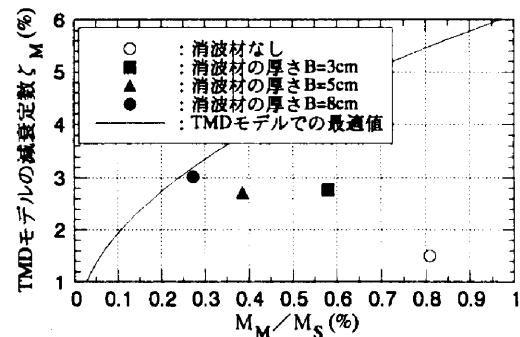
図-6 TMDモデルによるカーブフィティング

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

表-1 最適にフィティングしたTMDモデルの諸元

外径 (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_M (Hz)	TLDモデルの 振動数 f_M (Hz)	TLD内の減衰 定数 M_D (kg)	有効質量比 μ^* (%)	TLD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 TMDモデルの減衰定数 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

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る。

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 $B=8$ 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、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。

今後はTLDを実構造物の設置することを想定し、実際の容器形状に近い試験体による実験を行う予定である。

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, 立見栄司, 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