

液体ダンパー (TLD) による 海洋構造物の波浪振動制御に関する研究

WAVE-EXCITED STRUCTURAL VIBRATION MITIGATION WITH TUNED LIQUID DAMPER

董 勝¹・李華軍²・高山知司³

Sheng DONG, Hua-Jun LI, Tomotsuka TAKAYAMA

¹工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²工博 中国青島海洋大学工学部 (〒266003 中国青島魚山路5号)

³フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The major objective of this study is to experimentally and theoretically investigate the characteristics of rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) under wave excitation. An obvious engineering motivation for this study is to explore the applicability of TLDs for suppressing the structural vibration of offshore platforms. The structural model used to perform experiments is scaled according to a full size platform by matching their dynamic properties. Rectangular TLDs of different sizes and water depths are examined. By observing the performance and the behavior of TLDs through laboratory experiments, the influence of a number of parameters is investigated. In an analytical or numerical study, a mathematical model that describes the nonlinear behavior of liquid in TLD and the interaction between TLD and structure is prerequisite. Validity of the mathematical model to simulate the behavior of liquid in TLD and TLD-structure interaction has been evaluated based on the experimental results.

Key Words: offshore platform, tuned liquid damper, structural vibration, rectangular container, shallow water wave theory

1. まえがき

脚柱式プラットフォームは海洋資源の開発, 利用などに広く用いられている. 海洋開発の進歩につれて, プラットフォームの建造水深はだんだん深くなってきている. 例えば, Mexico Gulf では, 水深 300m を超える地点に建設が計画されている. このような深い水深におけるプラットフォームの設計理念は, 他の構造物と同様に, 安全性や経済性などについて最適なものを追求することにある. 安全性の追求は, 波浪, 風, 流れあるいは潮汐などの荷重に対し, 構造物材応力を許容限度内におさえることおよび波浪による構造物の動の応答変位を最小におさえることが主な目的である.

Tuned Liquid Damper (以下 TLD) を利用して, 海洋構造物の振動を減少させる方法は地上構造物に対する振動制御法として最初に提案された¹⁾. TLD は Tuned Mass Damper (以下 TMD) と原理が似ている.

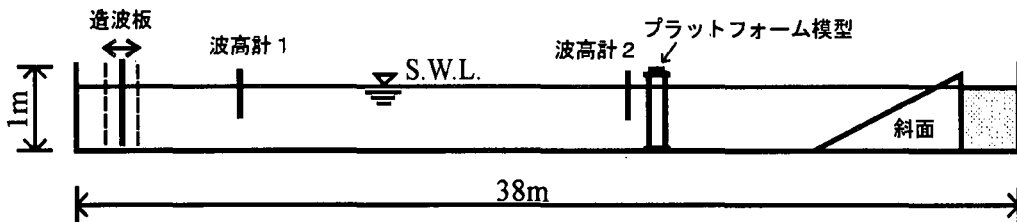
TLD による海洋構造物の振動振幅の減少は建築物に作用する波力とは異なる方向に作用するスロッシング波力が作用するためである. 底面と側壁での液体の摩擦およびスロッシングの砕波によってエネルギー逸散が生じる.

本研究では, 実験と理論によって波浪による構造物の振動を TLD を用いて制御したときの構造物の振動特性を解析したものである. そして, 海洋構造物に対して TLD による振動制御の可能性についても検討している.

2. 解析理論

(1) 基礎方程式の定式化

図一1 に示すように, TLD として容器をプラットフォームの上に置く. 静止液面の中央に原点 o をとり, 水平方向に x 軸, 垂直方向に z 軸をとる. x 方向の容器幅を R , 静止時の液深を h_T で一定とし, 容器

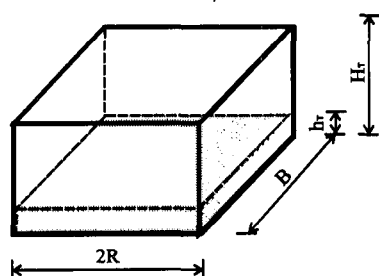


図—3 実験水路と計測装置の配置

0.7m の造波水槽の中に模型のプラットフォームを設置し、レーザー変位計を用いて、デッキ部の振動変位を測定した。その実験の模型縮尺は中国の渤海湾にあるプラットフォームを参考にして決定した。模型は矩形スチールプラットをビニール製円柱 4 本で支持する形状である。プラットフォームのデッキは比重が 7.8 の鋼製であり、円柱は外径が $D=32\text{mm}$ で、 $t=3.5\text{mm}$ の塩化ビニール製、比重は 1.37、ヤング率は $E=281\text{KN/cm}^2$ である。デッキ重量は約 176N を用いた。模型の固有振動周波数は 1.43Hz、減衰定数は 1.84% である。実験時の水深は $h=50\text{cm}$ であり、使用した波浪は、周期が $T=1.3\sim 1.8\text{sec}$ 、波高が $H=6\sim 14\text{cm}$ の範囲のものである。

実験では使用した TLD の容器はプラスチックで製作した。図—4 に示すように TLD の諸元は長さを $2R$ 、幅を B 、深さを H_T である。表—1 に TLD のサイズを表す。TLD の実機としては、長さが 80cm 程度のものを考えられる。

液面動揺の第一次固有振動数 f_T は線形理論⁹⁾によれば、



図—4 TLD 概念図

表—1 TLD 主要なパラメータ

Parameter	Symbol	Type			
		TLD1	TLD2	TLD3	TLD4
Inside length (cm)	$2R$	20	15	15	12
Inside width (cm)	B	15	20	12	15
Depth (cm)	H_T	20	20	20	20
Weight (g)	M_T	750	750	560	560

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.841g}{R} \tanh \frac{1.841 \cdot h_T}{R}} \quad (7)$$

ここで、 h_T は水が静止するとき、容器中の液体深さである。

(2) 実験方法

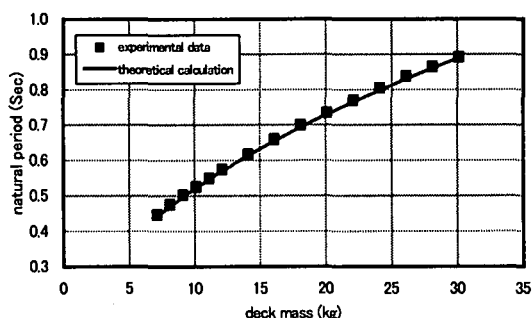
a) プラットフォームの固有振動周期の測定

実験ではプラットフォームの固有振動周期、減衰係数等の振動特性を求めて、水中で自由振動実験を実施した。モデルの天端に初期強制変位を与えて、瞬間開放させることによって、自由振動を与えた。記録した減衰曲線から固有振動周期と減衰定数を得られる。

また、プラットフォームの固有周期は 1 自由度の構造物にモデル化した振動解析を行うことにより算出される。結果は図—5 に示す。図—5 に示すように測定値と理論値はよく一致している。

b) 質量係数 C_m と抗力係数 C_d の測定

二次元造波水槽中の波浪運動は Stokes の 3rd order 理論によって計算される。1 本の脚柱の底端に貼りつけた Strain gage を利用して、脚柱が受けた波浪力を測定した。その波浪力から Morison 方程式の C_m 、 C_d を最小二乗法で求めた。その結果、 $C_m=1.5$ 、 $C_d=1.0$ となった。



図—5 プラットフォームの固有振動周期

表—2 実験ケース

TLD type	TLD optimum liquid depth			Effect of wave height			Effect of wave period		
	h_T (cm)	H_w (cm)	T_w (Sec)	h_T (cm)	H_w (cm)	T_w (Sec)	h_T (cm)	H_w (cm)	T_w (Sec)
rTLD1	2.5~4.5	12	1.4	3.5	6~14	1.4	3.5	10	1.3~1.8
rTLD2	1.2~2.6			1.8			1.8		
rTLD3	1.2~2.6			—					
rTLD4	0.8~1.8			—					

c)共振時模型振動変位測定

模型をTLDなしの状態で水槽中に置く。波浪の周期は1.4Sec, 模型固有周期の2倍時に共振現象が発生していた。例えば, この周期で規則波高が12cm, 10cm のとき, 模型の変位はそれぞれ7.2mm, 4.6cmと測定され, 変位量が非常に大きくなっている。

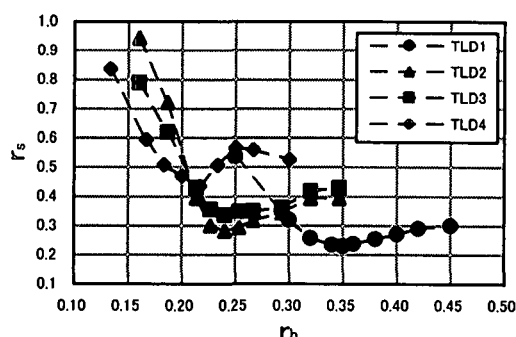
d)波浪により共振の抑制

TLD を利用し, プラットフォームの振動を変化させている。実験に用いたケースを表—2 に示す。

4. 実験とシミュレーションの比較

(1)TLD 最適水深の確定

図—6 に示すのは, 水深 h_T を変位させたとき, プラットフォームの振幅の関係を示したものである。ここで, 4種類のTLDを用いた。横軸は相対水深で $r_h = h_T / R$ と表され, 縦軸は相対振幅で $r_s = S_r / S_o$ と表される。ここで, S_r はTLD設置時の最大振幅, S_o はTLDなしの場合のプラットフォームの最大振幅である。図—6によれば, 水深が増加するにつれて, 振幅はだんだん小さくなる。しかし, ある特定値を



図—6 模型相対振動応答とTLD水深関係

超えれば, 振幅は再び大きくなる。この特定値は最適TLD水深を決定する。

TLD1, TLD2, TLD3 及び TLD4 の最適水深は3.5cm, 1.8cm, 1.8cm 及び 1.3cm であった。TLDを含むプラットフォームの全重量に対するTLD重量の割合は, TLD1からTLD4に関してそれぞれ5.8%, 3.0%, 1.8%, 1.3%となっており, TLD重量の占める割合は非常に小さいことがわかる。このことはTLDの重量がプラットフォームの振動モードに対する影響は小さいことを示している。

式(7)によって, 水深 h_T とTLDの固有振動数と関係が与えられる。容器の長さがTLD2とTLD3の場合, 最適水深は固有振動とほぼ等しい水深のときに, 振幅は一番小さくなった。

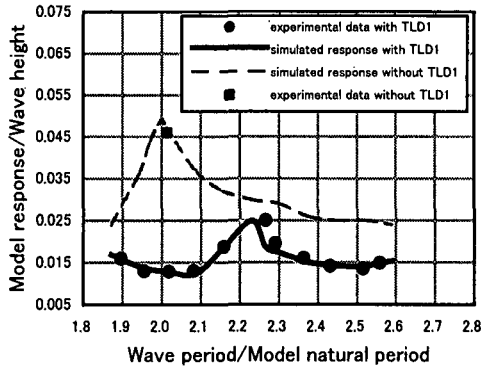
TLDの振動数がプラットフォームの自由振動数と一致するとき, 振幅はTLDとしての効果が高く, このために, このような制振装置を同調液体Damperと呼んでいる。

また, 図—6によって, 実験中に用いたTLDは, 全水深範囲で振動を抑制する効果があることが明らかになった。

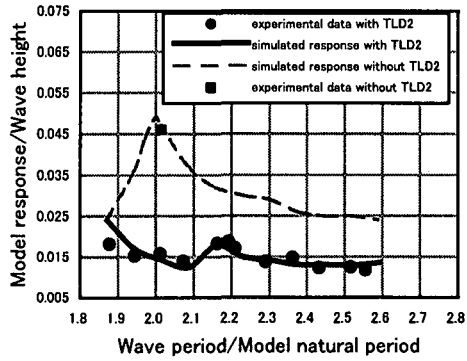
(2) 波浪周期の影響

図—7と8は, 波浪周期を変化させた時のプラットフォームの振幅の変化を表したものである。図中の■はTLD非設置時のデッキ変位の左右振動振幅の最大値で, ●はTLD設置時のデッキ左右変位の最大値である。破線はシミュレーションによるTLD非設置時デッキ変位における左右動揺の最大値で, 実線はシミュレーションによるTLD設置デッキ変位振幅である。横軸は波浪周期と模型自由振動周期の比で, 縦軸はデッキ変位と波高の比である。図—7と8によれば, 波浪周期はプラットフォーム自由振動周期の2倍数時, 振動は一番小さくなる。この特性を使用して, 振幅の小さいプラットフォームを設計すればよい。

と、碎波が生じて、実験値が計算値より小さくなっている。これは計算では碎波の影響を考慮していないためである。



図—7 波周期に対する TLD1 の振動減衰効果についての実験値と計算値の比較

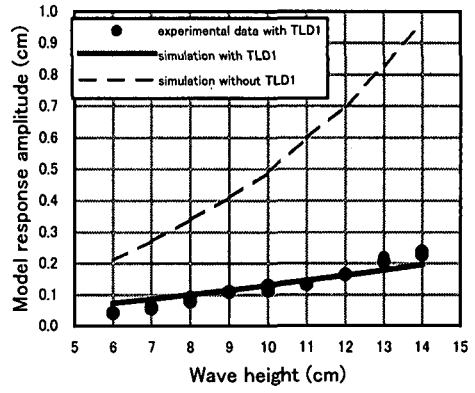


図—8 波周期に対する TLD2 の振動減衰効果についての実験値と計算値の比較

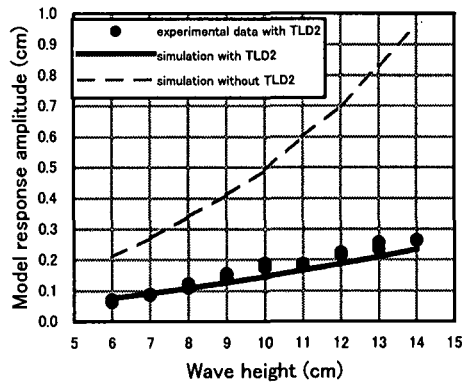
(3) 波浪波高の影響

図—9 は、波浪波高を変化させた時、プラットフォームの振幅の変化を表したものである。図中の●は TLD 設置時のデッキ左右変位振幅の最大値である。破線は理論計算における TLD 非設置時におけるデッキ変化の左右動揺最大値で、実線はシミュレーションによる TLD 設置デッキ変位振幅である。横軸は入射波高で、縦軸はデッキ変位である。図—9 によれば、入射波高が増大するに伴い、デッキ変位は大きくなる。この増加は小さい長さの TLD により、波高は 10cm 時、碎波現象が出現した。それから、波高の増加につれて、変位は大きくなる。このために大きい TLD を採用する方がよいと考えられる。しかし、大きいサイズの TLD について、同じ振動数ならば、水深が大きくなければならない。深い液体は振動時に、ほとんど動かない。そして最適なサイズが存在するものと思われる。これは今後の課題をとする。

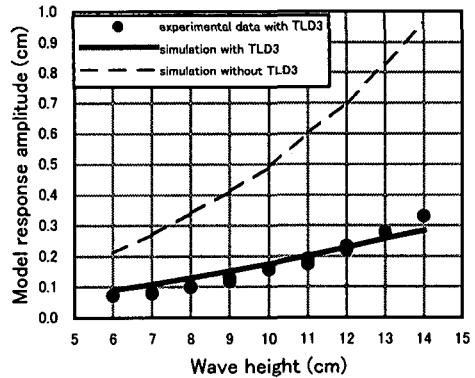
図—10 および図—11 は図—9 とほぼ同じ傾向を示しているが、図—12 は入射波高が 10cm 以上になる



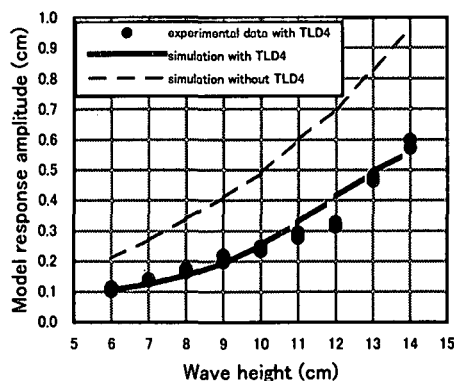
図—9 波高に対する TLD1 の振動減衰効果についての実験値と計算値の比較



図—10 波高に対する TLD2 の振動減衰効果についての実験値と計算値の比較



図—11 波高に対する TLD3 の振動減衰効果についての実験値と計算値の比較



図—12 波高に対する TLD4 の振動減衰効果
 についての実験値と計算値の比較

5. あとがき

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 適切にサイズと水深を設定した TLD によってプラットフォームの振動を著しく制御することができ、TLD の効果が明らかになった。

(2) TLD 内の液体動揺周波数がプラットフォームの固有周波数と一致した時に、構造物の振動減衰は最も大きかった。

(3) 本実験で検討した範囲では同じ構造物に対して、TLD サイズが大きいほど減衰効果は大きかった。

(4) 実験によって、入射波の周波数がプラットフォームの固有周波数の約 1/2 倍になったときに、最大の減衰が得られることが分かった。まだ、広い範囲の入射波周波数に対してもプラットフォームの振動は減衰した、このことは不規則波に対するプラットフォームの振動制御に有効であることを示している。

(5) シミュレーション結果と実験結果とはよく一致した。その結果、このモデルが TLD と構造物の相互作用や TLD の最適設計に適用できることが分かった。

最後に、本実験を行った当って、助言と指導をしていただいた京都大学防災研究所藤木繁男技官に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Housner, G.W.: Dynamic pressure on accelerated fluid containers, *Bulletin of the seismological society of America*, Vol.47, pp15-35, 1957.
- 2) Bauer, H.F.: Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excitation structures, *J. Sound and Vibration*, Vol.93, No.1, pp117-133, 1984.
- 3) Fujino, Y., et al.: Parametric studies on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free-oscillation experiment, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE., No.398, pp381-391, 1988.
- 4) Reed D., et al.: Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation, *Engineering mechanics*, Vol.124, No.4, pp405-413, 1998.
- 5) Takayama, T.: Theory of transient fluid waves in a vibrated storage tank, *Rept. Port and Harbour Res.Inst.*, Vol.15, No.2, pp3-53, 1976.
- 6) Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B.M., and Chaiseri, P.: Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular TLD-simulation and experimental verification, *Structural Eng./Earthquake Eng.* JSCE, Vol.6, No.2, pp251-262, 1989.
- 7) Miles, J.W.: Surface wave damping in closed basins, *Proceedings of Royal society of London*, A297, pp.459-475, 1967.
- 8) Sarpkaya, T., and Isaacson, M.: *Mechanics of wave forces on offshore structures*, New york: *Van Nostrand Reinhold Company*, 1981.
- 9) Lamb, H.: *Hydrodynamics*, Cambridge: *Cambridge University Press*, (6th edition), pp.363-475, 1997.