

Tuned Sloshing Damperの振動特性と制振効果

On natural vibration and damping effect of
Tuned Sloshing Damper

中垣亮二* 有馬健次***
植田利夫** 加道博章****

by Kyouji Nakagaki, Kenji Arima,
Toshio Ueda, Hiroaki Kadou

Since Bauer and the authors presented the paper showing that the sloshing of water in a tank acts as dynamic damper for reducing vibration, a lot of investigations have been carried out by civil engineers. Tuned sloshing damper(TSD) is not only simple and free of maintenance, but also available for reducing vibration. The authors showed that measured damper effect was in good agreement with one calculated by the proposed method in which the sloshing mechanism was simulated mass-spring systems.

This paper deals with experimental investigation into the characteristics and the damper effect of TSD. The authors carried out systematically model test by using the TSD models and the tower models. The authors obtained the conclusions that the natural frequency of TSD increases as the amplitude of excited vibration but wave height response of water in TSD decreases, and the improved theory gives theoretical coupled natural frequency and response in good agreement with the measured one.

1. 緒 言

構造物の振動抑制を行う動吸振器として、水槽内流体のスロッシング現象を利用することが非常に有効であることが、Bauer¹⁾や著者らの1人²⁾により提案されて以来、長方形や円筒形の容器である Tuned Sloshing Damper(TSD)の実用化について数多く研究されてきた。^{3)~11)} TSDの固有振動数は機械的動吸振器に比べて比較的容易に変化でき、その構造は簡単であり、メンテナンスフリーなどの長所を考えると高層建築物や塔構造物には最適である。橋梁の主塔架設時などで、風による自励振動が発生する様な、振動面で不安定な状態に対してTSDの適用が注目されている。⁶⁾¹⁰⁾

本論文では、著者らの1人²⁾が海洋構造物を対象にして検討した長方形水槽内の流体運動を利用した制振方法の研究成果を基礎にして、塔状構造物の制振に適用できるTSDの振動特性及び制振効果を検討する。TSDの振動特性に関して、

- (1) 減衰率に対応する流体の抵抗係数 λ を大きくする目的の十字断面棒抵抗体の影響
- (2) TSDへの強制加振変位振幅の影響

* 日立造船環境鉄構事業部 (〒554 大阪市此花区桜島1丁目3-40)

** 工博 同 上

*** 工博ニチゾウテック技術本部 (〒554 大阪市此花区桜島1丁目2-23)

**** 同 上

について系統的に実験的検討を行うと共に、 λ の特性について考察する。TSDの制振効果に関しては、塔模型にTSD模型を搭載した振動実験を行い、それらに対する理論的検討をも実施する。

2. TSD振動特性実験

2.1 使用模型

Fig. 1は本実験で使用した3種類のTSD模型(T30, T120, T200)を示す。これらの模型は長方形水槽であり、T30とT120はアクリル製、T200は鋼製(前面板はアクリル製)である。T30は制振効果確認実験用模型で、T120とT200はTSDの振動特性を明らかにする為の模型である。3体の模型共に減衰を高める十字断面棒抵抗体(Fig. 2)を取付けられる工夫がされている。^{12) 14)}

2.2 実験方法

実験は、Fig. 3に示す様に、TSD模型を2^{tf}加振振動台に設置して、その模型内部水の水位変動を3本の容量式水位計(計測技研CHT-4)で、振動台加振変位について小変位では、摺動式変位計(東京測器CDP-50)、大変位では巻込式変位計により各々計測して行なった。著者らは既にT120模型を対象に十字断面棒抵抗体の本数及び設置位置の影響について詳細に検討したが、^{12) 14)} 本論文では加振振幅の影響を検討することにした(Table 1)。Table 1の最大加振振幅は内部水が砕波状態で容器内壁から外に飛出す限界値である。

2.3 実験結果

(1) 固有振動数

Fig. 4はT30模型で得られた加振変位と水面変位の伝達関数の実測例を示す。¹⁴⁾ 水位最大値である共振振動数(固有振動数)付近で、それらの位相差が0°から-180°へと急激に変化し、通常の振動系と同様な挙動を示している。このことから非線型性を示す波高の高い場合を除いて、スロッシング現象を質点系振動モデルに置換できることが推定できる。^{2) 14) 18)}

Table. 2は、模型T120, T200を加振振幅1mmで得られた1次スロッシング周波数の実測値 f_e をまとめたものである。水深 d が深くなると周波数が高くなり、水面長 a が長くなると周波数が低くなる。(Fig. 5) 同表には、線型理論で与えられるスロッシング周波数の理論値 f_t

$$f_t = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \cdot \frac{m\pi}{a} \cdot \tanh \frac{m\pi}{a} d} \quad (1)$$

$$(m = 1, 3, \dots, 2n-1)$$

をも示したが、 f_e と f_t は良好な一致が見られる。

(2) 減衰特性

TSDが円振動数 ω 、加振変位 X で調和振動加振された場合の壁面位置での波高 η は

$$\frac{\eta}{x} = \frac{a\omega^2}{g} \sqrt{\left\{ 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum \frac{1}{m^2} \frac{\omega^2(\omega^2 - \omega_m^2)}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + \lambda^2 \omega^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{4}{\pi^2} \sum \frac{1}{m^2} \frac{\lambda \omega^3}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + \lambda^2 \omega^2} \right\}^2} \quad (2)$$

で近似的に与えられる。²⁾ ここで、 ω_m は式(1)で与えられる固有円振動数であり、 λ は速度に比例して生じる抵抗力の係数で実験的に求められるものである。^{12) 13)} 最近では λ に関する理論的検討が見られるが、^{15) 16)} Re数の影響などの不明な点が残されている。著者らは実測波高が式(2)で得られる波高と一致する λ を逆算し、減衰特性を議論する。Fig. 4には実測波高に一致する $\lambda = 0.155$ を用いて、式(2)により1次固有振動について得た理論値を実線で示した。¹⁴⁾

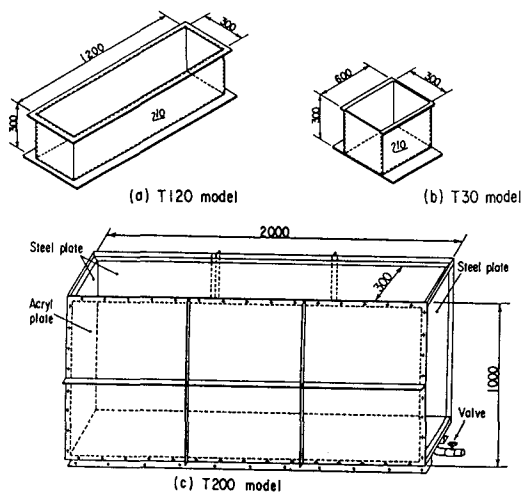


Fig. 1 TSD 模型

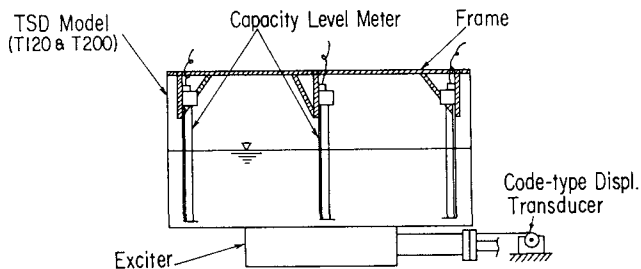


Fig. 3 TSD 振動特性実験実施要領

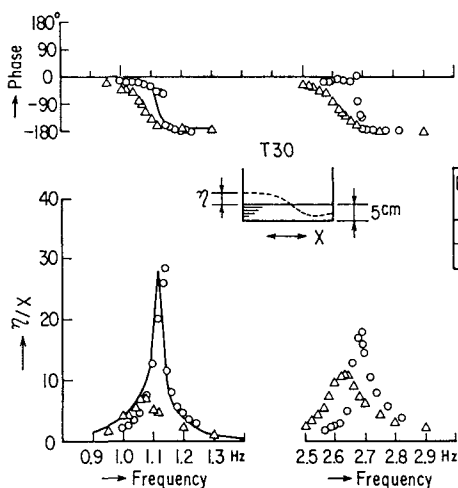


Fig. 4 TSD 波高応答曲線

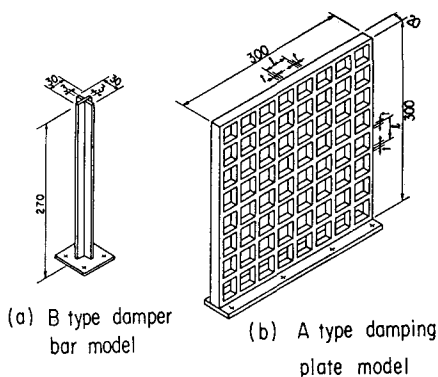


Fig. 2 抵抗力模型

Table 1 TSD 振動特性実験条件

Model	Damping bar	Water depth (cm)				
		5	10	15	30	50
T120	—	1~15	1~13	1~12	—	—
	3	—	1~18	—	—	—
T200	—	—	—	1~25	1~25	1~20
	3	—	—	1~40	1~40	1~30
	5	—	—	1~45	1~40	—

Unit : mm

Table 2 TSD 固有振動数

Model	Water depth (cm)	5	10	15	30	50
		5	10	15	30	50
T120	f_e	0.293 ^{Hz}	0.422 ^{Hz}	0.503 ^{Hz}	—	—
	f_1	0.291 ^{Hz}	0.408 ^{Hz}	0.493 ^{Hz}	—	—
	ε	-0.7 %	-3.4 %	-2.0 %	—	—
T200	f_e	—	—	0.302 ^{Hz}	0.413 ^{Hz}	0.504 ^{Hz}
	f_1	—	—	0.300 ^{Hz}	0.414 ^{Hz}	0.506 ^{Hz}
	ε	—	—	-0.6 %	0.2 %	0.4 %

Remark ; f_e : Measured natural frequency ($X=1\text{mm}$)

f_1 : Theoretical natural frequency

$\varepsilon : \frac{(f_1 - f_e)}{f_1} \times 100$

Damping Bar	Mark	
	Exp.	Theory
—	○	—
B 3x1	△	×

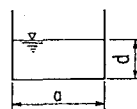


Fig. 5 TSD 形状

λ は減衰特性を表わす値であり、加振振動数 f で割ることにより等価対数減衰率 $\delta = \lambda/2f$ と評価できる。¹²⁾ TSDの制振率を高める為に、減衰率を適当に大きくする必要があり、TSDの中央横断面に十字断面棒抵抗体を設けることが簡便且つ有効であることが、著者らの実験により認められた。^{12) 14)} Fig. 6が模型T120に対して上記抵抗体を付加した場合の振動実験計測例である。¹²⁾ 抵抗体の本数が増加するにつれ、波高が低くなり減衰が大きくなることが分る。これは抵抗体の先端部から渦が湧出し、この渦の発生により減衰増加が生じるものである。(Fig. 7) Fig. 6から、波高の減少に伴ない固有振動数が低くなる傾向があることが認められる。このことは一般の振動系に見られる、減衰が大きくなるにつれて固有振動数が低くなる現象に対応している。

Fig. 8はFig. 6の実測波高から λ を算定し、抵抗体の閉塞率についてまとめたものである。¹²⁾ λ の実測値は閉塞率に対してほぼ一直線上に並ぶことが分る。なお、同図中のX印は格子型抵抗体(Fig. 2)を用いた実測値である。

3. 加振変位振幅のTSD振動特性への影響

本章では前章で実施した特性実験に於て得られた加振変位振幅の影響について考察する。

3.1 固有振動数

Fig. 9はT200模型の加振変位振幅によって変化する固有振動数をまとめた図である。これらの固有振動数は、Fig. 4に示す様に、応答波高のみならず位相変化に注目して求めたものである。加振振幅が大きくなるに伴い、固有振動数が高くなるハード型非線型性を示す。¹¹⁾ 水位が低い程、その傾向が強く見られる。本実験で見られる加振振幅による固有振動数の変化の理由には非線型の影響の他に、TSDを振動させているので、TSD内壁と内部水の動きで見掛上内部水の自由表面長(TSD内壁間距離)が変わることが考えられる。¹⁴⁾ Fig. 9の抵抗体なしの場合について加振振幅増加による実測固有振動数の増加(加振振幅 $X = \pm 0.1$ cmの固有振動数に対する)をまとめると、Table 3となる。同表中には、自由表面長 $L = 200$ cmより加振振幅を差し引いた場合の理論固有振動数の増加をも示した。理論値は実測値より小さいが、その定性的傾向は良く似たものになっている。

3.2 減衰特性(抵抗係数 λ)

T200模型に於て、水深 $d = 15$ cmでの加振変位振幅 X を変えた場合の応答波高についてまとめると、Fig. 10になる。ただし、応答波高 η は X で無次元化を施している。 X が大きくなるにつれ、波高応答無次元値 η/X は抵抗体の有無にかかわらず、一定値に収れんする傾向がある。この傾向は文献12)で示した実測結果(T120模型を対象)に於ても認められる。⁸⁾ 水深が浅くなるにつれて、 η/X は大きくなるが、十字断面棒抵抗体の本数が多くなると、 η/X は小さくなる。また、内部水の自由表面長(タンク長)が短くなると η/X が大きくなることも分る。¹⁴⁾ これは流動水の体積によって決まるものと考えられる。

Fig. 11はFig. 10の波高応答実測値から逆算して求めた λ をまとめた結果である。 λ の傾向は波高応答の傾向とは全く逆であり、加振振幅 X の増加と共に λ の増加が見られる。また、抵抗体の本数が増えたと λ が大きくなり、 λ の増加には抵抗体が有効であることが分る。

模型T120,¹⁴⁾ T200の λ の実測値について、加振振動数 f 、波高応答無次元値の逆数 X/η で割った値 $\bar{\lambda}$ を X に対して整理すると、Fig. 12になる。 $\bar{\lambda}$ は加振振幅に無関係でほぼ一定値を示すが、水深には比例する傾向にある。更に、抵抗体の有無による差は顕著には認められない。この事は抵抗体により波高が低くなると λ が大きくなるという関係がある為である。

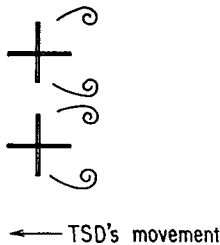


Fig. 7 抵抗体先端部
渦発生状況

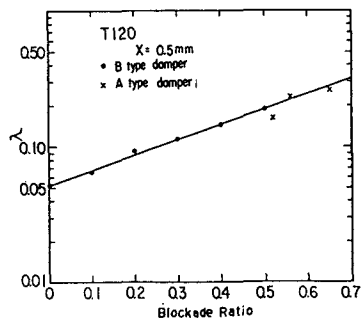


Fig. 8 λ と閉塞率の関係

Table 3 加振振幅変位による
固有振動数の変化

Water depth		Amp. of exciting disp.	
		$X=\pm 2.0\text{cm}$	$X=\pm 5.0\text{cm}$
$d=15\text{cm}$	Δf_t	0.006	0.015
	Δf_e	0.010	0.025
$d=30\text{cm}$	Δf_t	0.005	0.010
	Δf_e	0.008	0.020

Unit : Hz

Δf_e : Measured natural frequency
 Δf_t : Theoretical natural frequency

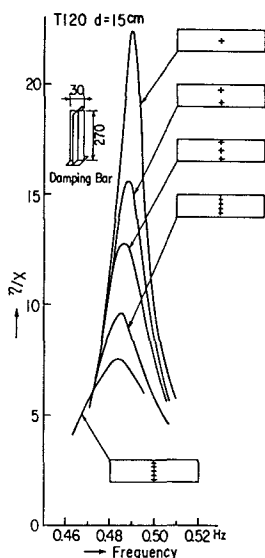


Fig. 6 TSD波高
応答曲線
(T120)

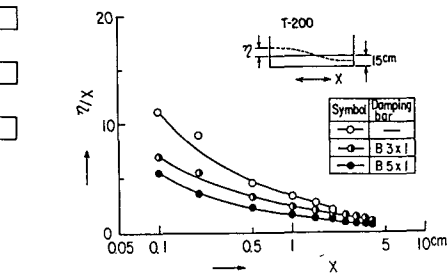


Fig. 10 加振振幅変位と波高応答

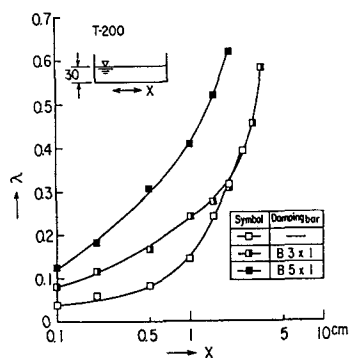


Fig. 11 (a) λ と加振振幅変位

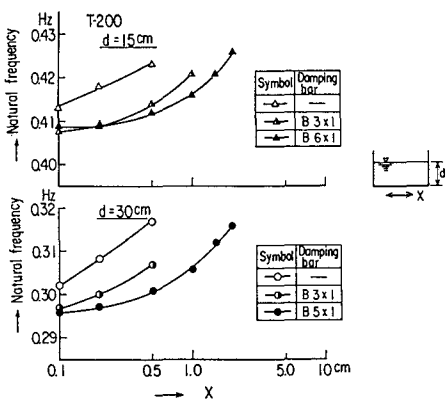


Fig. 9 加振振幅変位による
固有振動数の変化

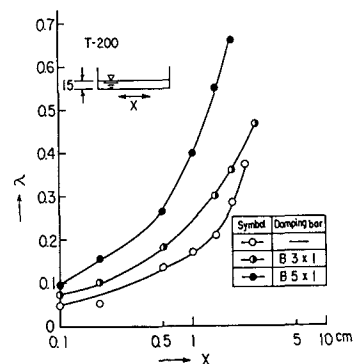


Fig. 11 (b) λ と加振振幅変位

λ は、Fig. 12 を考慮すれば大略

$$\lambda = \bar{\lambda} \cdot \frac{X}{\eta} \cdot 2f = C \cdot d \cdot \frac{X}{\eta} \cdot 2f \quad (3)$$

ここで、 C は定数（容器形状などで変化）

の式で与えられると考えられる。一方、Lepelletier¹⁵⁾や Miles¹⁶⁾が提案している λ は

$$\lambda = \frac{1}{\eta + h} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \nu} \{ 1 + (2 \frac{h}{b}) + \bar{C} \} \quad (4)$$

であり、式(3)とは異なっているが、これは等価線型化を行なった為である。

4. 制振効果確認実験

4.1 使用模型と実験方法

Fig. 13 に示す様に、T30 模型を搭載した塔模型を 2^{tf} 加振台に設置して制振効果確認実験を実施した。¹⁴⁾ (Fig. 14) 加振台、塔模型頂部の動きはサーボ型加速度計（共和電業 ASQ-1BL）、TSD 模型内部水水位変動はサーボ型水位計（計測技研 NST10）で各々計測した。制振効果を示す為に強制変位と各応答値の関係を FFT アナライザーで処理して応答関数を得た。また、共振時での塔模型固有振動モードの計測には重量の小さい圧電型加速度計（B&K 4285）を用いた。なお、塔模型の振動特性の詳細は文献14)にまとめている。

4.2 実験条件

Table 4 は制振効果確認実験の条件を示す。実験番号 1, 2 は脚柱板厚 4.5 mm の塔模型（M1）を用いた実験であり、実験番号 3 - 6 は脚柱板厚 6 mm の塔模型（M2）を用いた実験である。T30 模型の内部水水位は 5 cm と一定にして、実験番号 1 ~ 4 では振動質量比 R が約 5 % 程度であるが、実験番号 5, 6 では $R = 1.8 \%$ と実用時に近い値に設定した。後者の実験では質量比が小さく、塔頂部変位が大きくなり TSD 模型内部水が共振時に外部に溢れた為、TSD 模型中央部に抵抗体 3 本及び 5 本を設けることにした。なお、強制加振変位は ± 0.5 mm と一定にしている。

4.3 実験結果とその考察

(1) 強制加振実験

Fig. 15 は実験番号 1 ~ 6 の計測結果を示す。各図中の上部は塔頂部応答曲線であり、下部は TSD 模型内部水の波高応答曲線である。同図中、●印は TSD 模型内部水なしの場合、○印は TSD 模型内部水ありの場合の塔頂部変位実測値を示す。また、●印は TSD 模型内部水の波高応答実測値を示す。

TSD 模型内部に水を入れることにより、TSD 内部水と塔とが連成し、2 個の固有振動が現われる。これらの固有振動数のはじき合い量 $\alpha^{17)}$ （連成固有振動数の差より、連成前の TSD 模型塔模型の固有振動数の差を差し引いた値）は、振動質量比 R の大きい実験番号 1 ~ 4 では、 R の小さい実験番号 5, 6 に比較して大きい。これは R が大きい程連成効果が大きいことを示している¹⁷⁾ 実験番号 1, 2 の塔頂変位応答に於て、1 次振動の実測値が 2 次振動のそれに比較して若干小さく、実験番号 3 ~ 6 では逆の傾向を示している。すなわち、前者の実験の 1 次振動が TSD 主体、2 次振動が塔主体の固有振動を示している。また、後者の実験は全く逆のことになる。連成振動現象では、よく知られている通り、連成固有振動数により近い固有振動数を持つ構造物が主体になる。

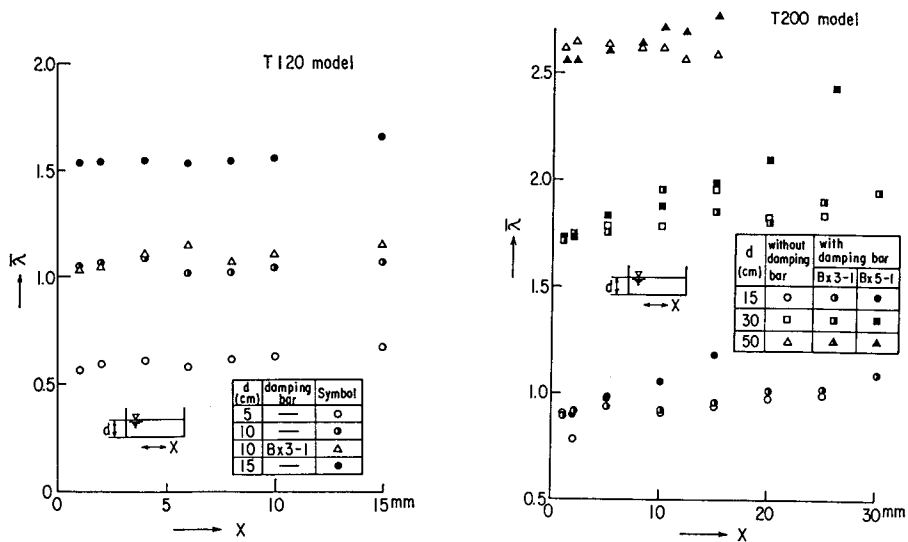


Fig. 12 λ と加振振幅変位

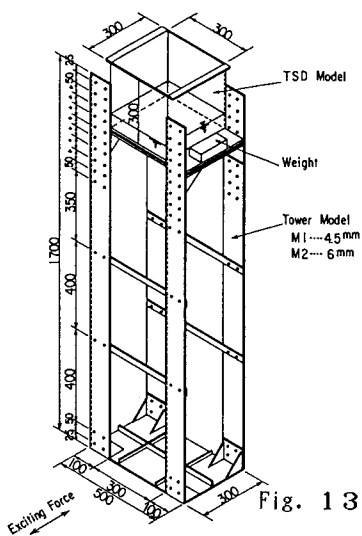


Fig. 13 塔模型 (T30 模型搭載)

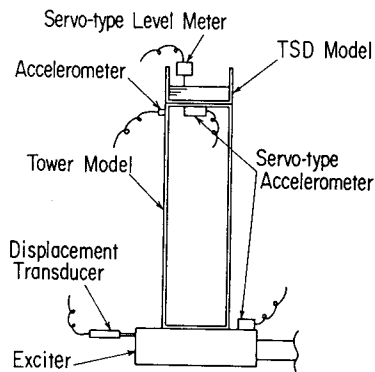


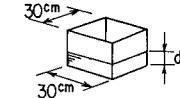
Fig. 14 制振効果確認実験実施要領

Exp. No.	TSD Model		Tower Model				$\nu = f_D / f_T$	$R = m_D / m_T$
	d(cm)	Damping	f _D (Hz)	Name	H(cm)	m _T (kg)	f _T (Hz)	
1	5	—	1.12	M1	130.0	62.0	1.11	0.056
2		3	1.07				0.96	
3		—	1.12	M2	168.0	68.0	1.06	0.051
4		3	1.07				1.01	
5		3	1.13				1.03	
6		5	1.13				1.03	

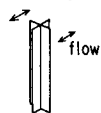
Table 4 制振効果確認実験条件

Remark:

(a) TSD Model



(c) Damping



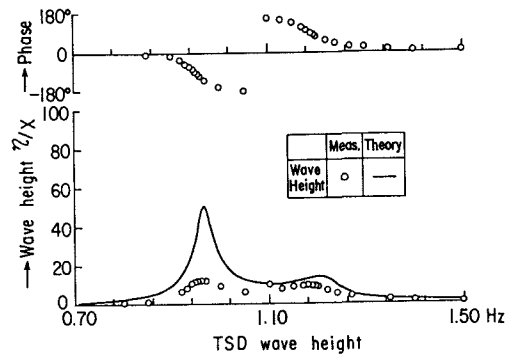
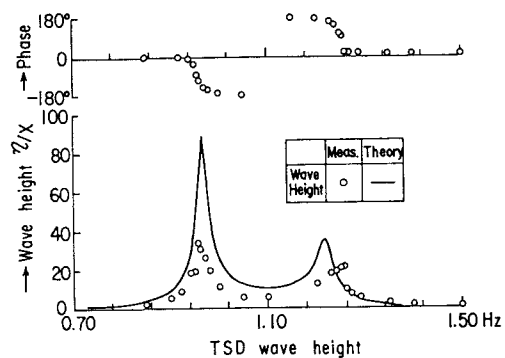
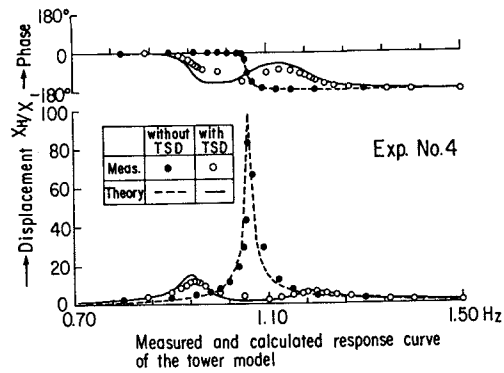
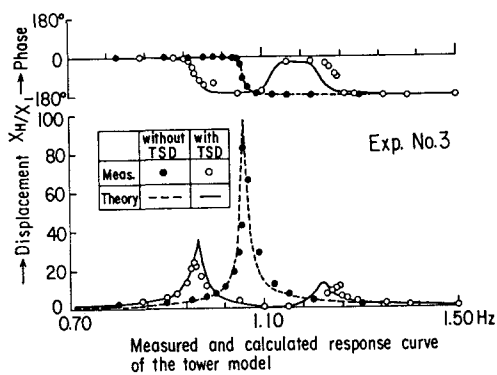
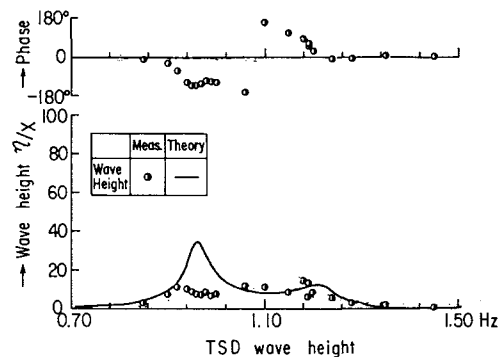
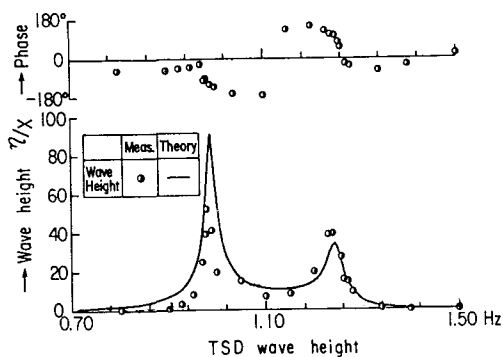
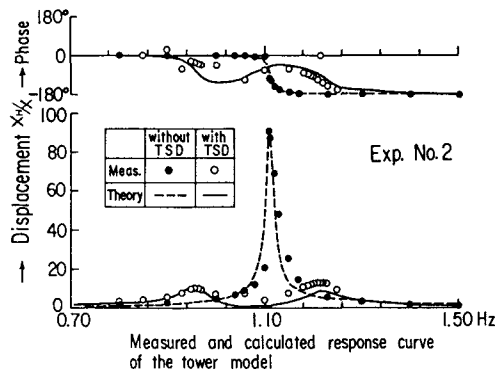
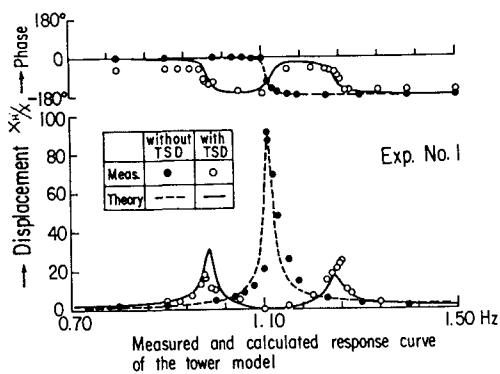


Fig. 15 (a) 強制加振実験応答曲線

塔頂変位の共振応答比 $A^{17)}$ (TSD有無での共振時応答の比)について、実験番号2,4と実験番号5と比較すると、前者のAは約 $\frac{1}{2}$ であり、後者のAはRが小さい為に約 $\frac{1}{2}$ と若干大きくなっている。Fig. 15から、十字断面棒抵抗体を設けることにより塔頂応答が極端に小さくなると共に、TSD内部水の水位変動も小さくなることが分る。これは減衰率が増加した為であり、塔頂変位応答の位相曲線が非常に緩やかな変化を固有振動数付近で示している。TSDの制振率を高めるには十字断面棒抵抗体を付加することが有効である。

Fig. 16は塔模型M2の共振時での振動モード実測例を示す。TSDを効かすことにより、塔模型の1次固有振動モードが2個現われる。同図に示す様に、塔頂とTSD内部水の動きが1次振動数で同相、2次振動数で逆相になることは、Fig. 15の位相曲線より分る。1次・2次振動モードの形状の差は基部付近を除いて余り認められない。

(2) 自由振動実験

Fig. 17は実験番号2と5の条件の下で行なった自由振動実験で得られた塔頂部の自由振動波形の実測例を示す。TSDを効かすことにより、塔模型の対数減衰率が見掛上極端に大きくなり、TSDを効かせない場合の δ の10~15倍程度になっている。振動質量比Rが大きい実験番号2の場合の δ はRの小さい実験番号5の δ より若干大きい値を示し、制振率がより高いことが分る。塔構造物に見られる風による自励振動に対して、TSDを設けると δ が見掛上大きくなるので、制振上非常に有効であると考えられる。

4.4 制振効果の実測値と理論値との比較

著者らの1人がHousnerの理論¹⁸⁾を用いてTSDの多質点系振動モデル(Fig. 18)による制振効果理論解析法を確立し²⁾、更に若干の修正を施して¹⁴⁾本実験に対して適用した。

Fig. 15の各図上部に塔頂部変位の理論値を実線で示した。応答及び位相差の実測値と理論値とは、TSDを効かした場合の固有振動数で少しの差が認められるが、おおむね良い一致を示している。TSDを設計する場合には本解析法が有効であることが分る。

Fig. 15の下部に示したTSD内部水の波高について、式(2)を用いて得た理論値を実線で示す。理論値と実測値は定量的な一致は見られないが、周波数に対して定性的には良く合っていると言える。このことから波高の理論的検討については今後引続いてこの方向で行う予定である。

5. 結 論

著者らの1人が得た長方形水槽内部水のスロッシング現象を利用した塔状構造物の制振法の研究成果を基にして、この種の動吸振器であるTSDの実用化を目的に、TSD模型を用いた振動特性実験及び塔模型による制振効果確認実験を行なった。

これらの検討結果から次の事柄が明らかになった。

(1) TSD内部水の波高の理論値と実測値を一致させる様に逆算して得た λ (流体の速度に比例する抵抗係数)は、固有振動数の2倍で割ることによりTSDの減衰率に対応する。

(2) TSD内部水に十字断面棒抵抗体を付加すると λ が大きくなる。また、その閉塞率が大きくなると λ は大きくなる。

(3) λ の値は水深、波高応答比の逆数、加振振動数にほぼ比例すると考えられるが、なお比例定数などについて理論的に詳細な検討を行う必要がある。

(6) Housner理論を用いた制振理論解析を用いると、TSDの制振現象を精度良く計算することが可能である。ただし、TSD内部水の波高計算については今後の課題である。

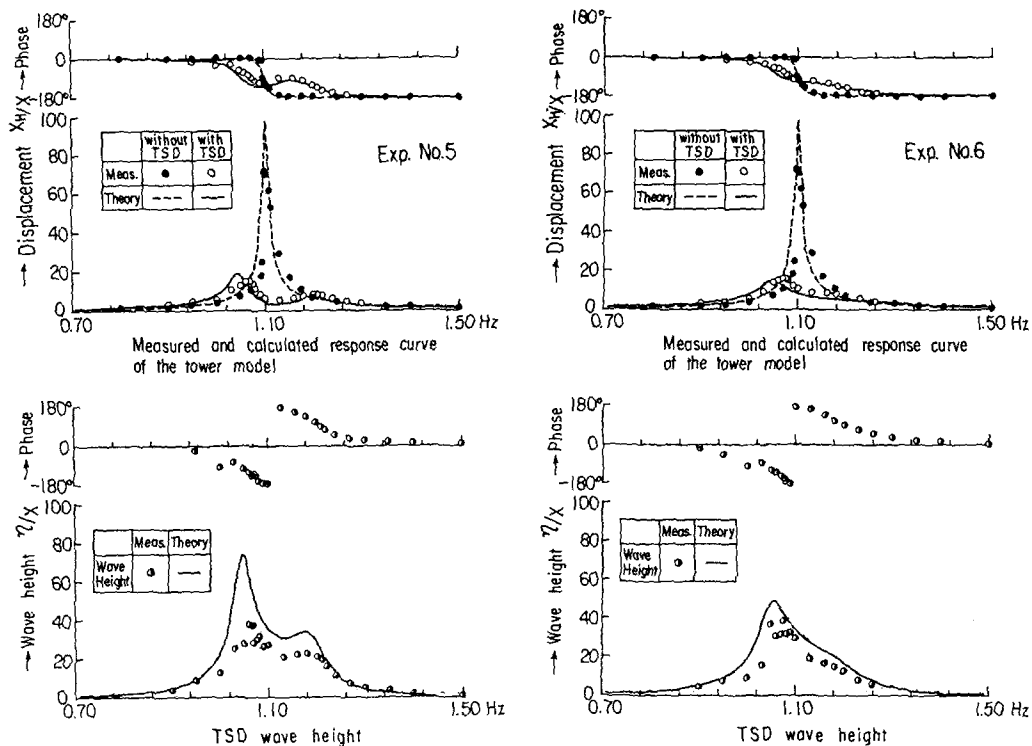


Fig. 15 (b) 強制加振実験応答曲線

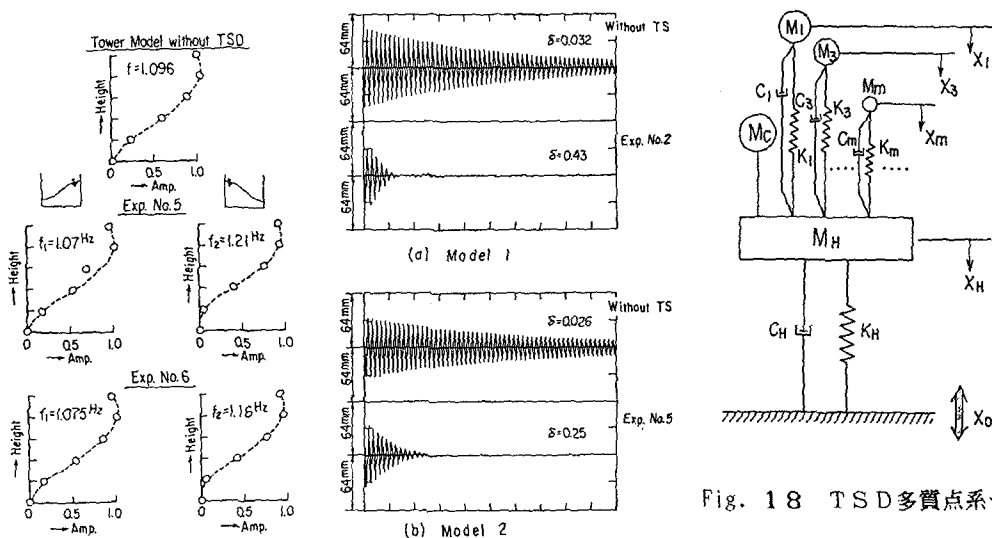


Fig. 16 塔模型実測振動 Fig. 17 自由振動実験応答波形
モード

最後に、本研究を遂行するに際し、終始御指導戴いた大阪大学名誉教授松浦義一博士（福井工業大学教授）、㈱ニチゾウテック技術顧問広渡智雪博士及び㈱ニチゾウテック取締役牛尾正之博士、更に模型実験実施に当り御助力戴いた日立造船㈱、㈱ニチゾウテックの各関係者に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Bauer, H. F. : Oscillation of Immiscible Liquids in a Rectangular Containers : a New Damper for Excited Structures, J. S. V., Vol. 93, No. 1 1984 .
- 2) 松浦義一, 松本互平, 水内充, 有馬健次, 城市浩, 林茂弘, 倉内流体運動を利用した防振法に関する基礎的研究日本造船学会論文集, 第160号 昭和61, 11月 .
- 3) 佐藤孝典 : Tuned Sloshing Damper (水槽のスロッシングを利用した制振装置), 土木学会第42回年次学術講演会 昭和62年9月 .
- 4) Chaiseri, P et al : Damper using Liquid Motion as Energy Dissipator—Tuned Sloshing Damper, 土木学会第42回年次学術講演会 昭和62年9月 .
- 5) 藤野陽三, チャイセリ, P, B. パチュコ, 藤井邦雄 : 同調液体ダンパー (TLD) の基本特性に関する実験の検討, 構造工学論文集, Vol. 34 A 1988年3月 .
- 6) 宮田利雄, 山田均, 齋藤善昭 : 塔状構造物制振用水槽ダンパーの開発, 構造工学論文集, Vol. 34 A 1988年3月 .
- 7) V. J. Modi, F. Welt : Damping of Wind Induced Oscillations through Liquid Sloshing, Proc. 7th Int. Conf. Wind Engineering (West Germany) July, 1987 .
- 8) 野路利幸, 立見栄司他 : スロッシングを利用した制振装置の研究 (その1), (その2), (その3), 土木学会第43回年次学術講演会 昭和63年10月 .
- 9) 大原英史, 久保善延, 金尾稔 : 液体振動を利用した鉛直振動の抑制効果について, 土木学会第43回年次学術講演会 昭和63年10月 .
- 10) 宮田利雄, 山田均, 齋藤善昭 : 長方形水槽ダンパー適用に関する諸問題の検討, 構造工学論文集, Vol. 35 A 1989年3月 .
- 11) 藤野陽三, ベニートM. パチュコ, 孫利民, ピャワット, チャイセリ, 磯部雅彦 : 同調液体ダンパーに関する非線型波動シミュレーションとその実験的検証 —長方形容器の場合—, 構造工学論文集, Vol. 35 A 1989年3月 .
- 12) 中垣亮二, 植田利夫, 有馬健次, 加道博章 : Tuned Sloshing Damper の振動特性と制振効果, 土木学会第44回年次学術講演会 1989年10月 .
- 13) 田宮真 : 遊動水の動的影響について, 造船協会論文集, 第103号 昭和33年6月 .
- 14) 有馬健次, 植田利夫, 加道博章, 中垣亮二 : 倉内流体運動を利用した防振法に関する基礎的研究 (その2), 日本造船学会論文集, 第165号
- 15) Lepelletier, G., F. Raichlen : Nonlinear Oscillation in Rectangular Tanks, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 1 1988.
- 16) Miles, J. W. : Surface Wave Damping in Closed Basins, Proceedings, Royal Society of London, A297, 1967.
- 17) 松浦義一, 松本互平, 水内充, 有馬健次, 城市浩 : 動吸振器による振動防止法に関する研究 (機械式動吸振器の場合), 関西造船協会誌, 第197号, 昭和60.

- 18) Housner, G. W. : Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, 1957.

(1989年10月2日受付)