

相似モデルによる液柱管ダンパーの制振実験

Vibration Experiment on Effect of Tuned Liquid Column Damper (TLCD) using a similitude model

* ** **

坂井藤一, 高枝新伍, 玉木利裕

by Fujikazu SAKAI, Shingo TAKAEDA and Toshihiro TAMAKI

An experimental study to verify the vibration suppressing effect of Tuned Liquid Column Damper (TLCD) was carried out. The SDOF-structure model was made to satisfy the kinematic similitude to the first natural mode of the actual structure. The effectiveness of TLCD was examined through free vibration tests and harmonic excitation tests. The experimental results are in a good agreement with the authors' theoretical treatment considering slight non-linearity of TLCD damping.

1. まえがき

構造物の振動制御装置として、容器内の液体の同調運動を利用することが研究され¹⁻⁷⁾、実際に塔状構造物に適用された例もいくつか見られるようになってきた。これらの同調液体ダンパーは、容器内の液体のスロッシングを利用したものがほとんどである。同調型ダンパーでは、ダンパーの減衰性によって制振性能が左右されるため、減衰を適切にコントロールすることが重要となる。

著者らは、そのため液柱管内の液体の往復運動を利用した液柱管ダンパー (TLCD) を提案し、その実用性を検討してきた⁸⁻¹⁰⁾。これと似た考え方は、船舶の減揺水槽として以前から知られている¹¹⁾が、TLCDはこれを一般化し、かつ構造物の制振装置としての実用化を考えたものである。

TLCDは、任意形状の液柱管内の液体の運動と液柱管内部に設けたオリフィスの減衰機構により、構造物に制振効果を及ぼすものである。前報⁹⁻¹⁰⁾では、著者らはTLCDの振動方程式を定式化し、基礎実験によりそれらを確認し、実際への応用について若干の考察を行った。

本論文では、TLCDの構造物制振効果を検証するために実施した構造物-TLCD連成系の模型振動実験の結果を述べ、著者らの理論による計算と比較して、その制振効果の有効性などを論じたものである。なお、ここで用いた模型は、実橋主塔の1次モード振動を対象とした1/10力学的相似模型である。

*工博, **工修 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 (〒136 東京都江東区南砂2-4-25)

2. 構造物-TLCD連成系の振動解析

2. 1 構造物-TLCD連成系の運動方程式

構造物にTLCDを搭載したときの連成系の運動は、構造物をその対象モードを想定して、1自由度系とすると、次の式で表される(図1参照)⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} M_i + m + \rho A L & \rho A B \\ \rho A B & \rho A L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_i & 0 \\ 0 & \rho \kappa A |\dot{y}|/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & 2 \rho A g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- M_i, C_i, K_i, f_i : 構造物の*i*次の一般化質量、一般化減衰、一般化剛性、および一般化入力
- L, B, A : TLCDの液体長、立ち上がり幅、および管断面積
- m : TLCDの容器質量
- κ : オリフィスの圧力損失係数
- ρ : 液体の密度
- g : 重力加速度
- x, y : 構造物およびTLCD液体の変位
- $(\dot{})$: 時間に関する微分

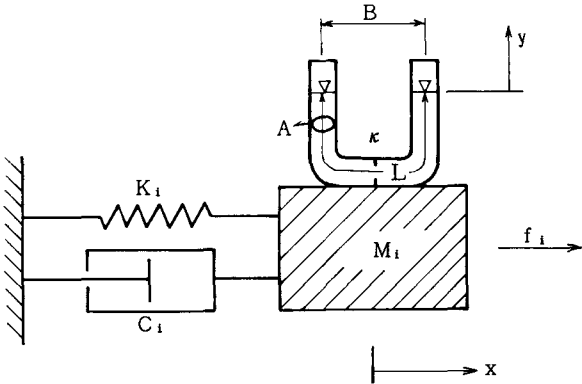


図-1 構造物-TLCD連成モデル

2. 2 定常応答解析

いま、変位および入力が次式のように表されるとする。

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= X \cdot \exp(i\omega t) \\ y(t) &= Y \cdot \exp(i\omega t) \\ f_i(t) &= F_i \cdot \exp(i\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

これらを式(1)に代入し、減衰項の非線型項を次のような等価線型減衰係数

$$C_{eq} = (8/3\pi) (\rho A \kappa / 2) \omega |Y| \quad (3)$$

により表せば、定常応答振幅XおよびYは、次式により求められる。

$$(X, Y)^t = (-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])^{-1} (F^t, 0)^t \quad (4)$$

式(3)に示すように減衰[C]には振幅依存性があるので、これを考慮するときには反復代入法によってX, Yを決定すればよい。ここに[M], [C], [K]は(1)式の質量、減衰、剛性マトリクスである。

3. 実験方法

3. 1 実験装置

ここでは、図-2に示すような振子型の1自由度系構造物模型を用い、それにT L C D模型を搭載して、自由振動および加振器による定常加振実験をおこなった。

構造物模型は、実橋主塔の1次モード振動を対象に縮尺1/10の力学的相似模型となるようにした。実橋の減衰は、対数減衰率 $\delta_s=0.01$ を想定し、模型では減衰調整槽により、これに近い値を設定した($\delta_s=0.008$)。なお比較のため、 $\delta_s=0.003$ の場合も実験を行った。

T L C Dは、事前の解析および検討によって、適当と思われる実物タイプを決定し、模型としてはその1/10縮尺の相似模型とした。図-3にT L C D模型(アクリル製、4個)を示す。実験はT L C D2個搭載の場合と4個搭載の場合を実施し質量比($\rho A L/M$)の影響を調べた。内部液体は水を使用し液体を加減して最適同調比を求めるようにした。ここで同調比 α はT L C Dの固有振動数の構造物の固有振動数に対する比である。オリフィスは、図-4に示すA、B、Cの3種類を用意し、次々に付け変えて、同一の実験を行い、開口率や形状の比較検討した。

振動実験に先立ち、まずT L C D単体の自由振動実験を行い、その減衰特性を把握した。連成系の自由振動は、人力により加振し、所定の振幅になったところで加振を中止し、自由振動状態を計測した。定常加振実験では、信号発生器により、ほぼ一定の正弦波入力になるようにコントロールし、加振振動数を0.01 Hz きざみで変化させた。

構造物の加速度、変位、T L C Dの液面の変位をそれぞれサーボ式加速度計、光学式変位計、容量式波高計で計測し、A/D変換器を介してパーソナルコンピュータに0.01秒きざみのデジタル値として記録した。

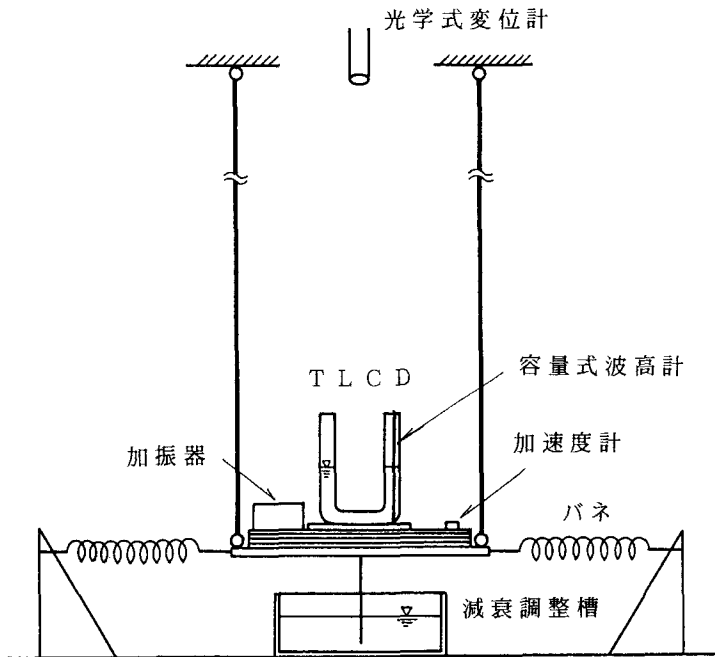


図-2 構造物-T L C D連成実験

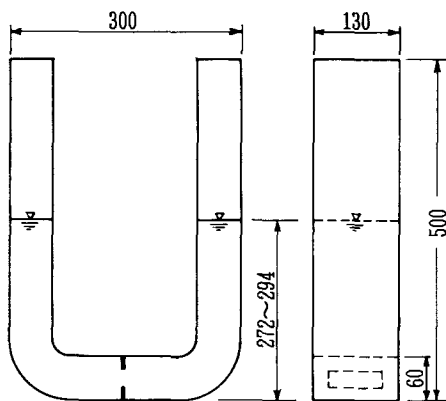


図-3 TLCD模型諸元

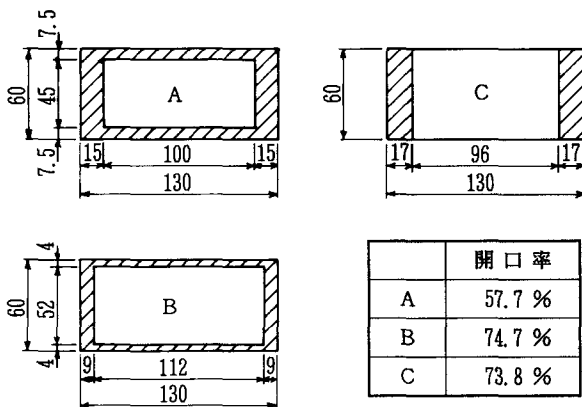


図-4 オリフィス形状

3.2 相似関係

実橋主塔と模型は表-1に示すような、Froude則による相似関係にある。なお、実橋では別に行われた風洞実験により2350mm程度の振幅の渦励振が予想されており、本実験ではこれに見合う定常加振実験を考え、一般化力と変位振幅を設定した。

表-1 模型と実橋塔との相似（渦励振振動を対象）

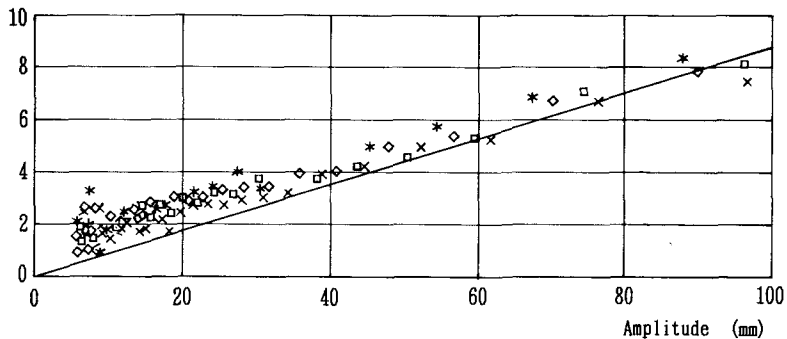
物理量	1/10模型相似比	実 橋 塔	模 型
一般化質量	$1/10^3$	705600kg	741.6kg
固有周期 (固有振動数)	$1/\sqrt{10}$ ($\sqrt{10}$)	3.697sec (0.2705Hz)	1.167sec (0.857Hz)
変位振幅	1/10	2350mm	261.4mm
対数減衰率	1	0.01	0.008
一般化剛性	$1/10^2$	2038000 N/m	21500 N/m
一般化力	$1/10^3$	15250 N	14.3 N

3-3 TLCDの減衰特性

ここで用いた3種類のオリフィスに対して、液柱管単体の自由振動実験から求めた減衰特性を図-5に示す。図では、式(3)から理論的に求められる等価線型減衰比も示してある。ここで理論値を求める際には、オリフィスによる損失に、管路の曲がりによる損失と液体と管壁の摩擦による損失を加えた損失係数を用いている。40mm以上の振幅で、理論値と実験値の対応はAとBが比較的好く、Cでは実験値の方が大きめの値を示している。

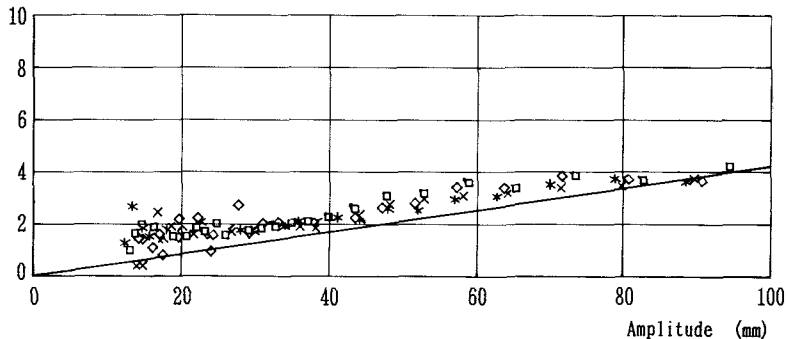
Damping

Ratio h %



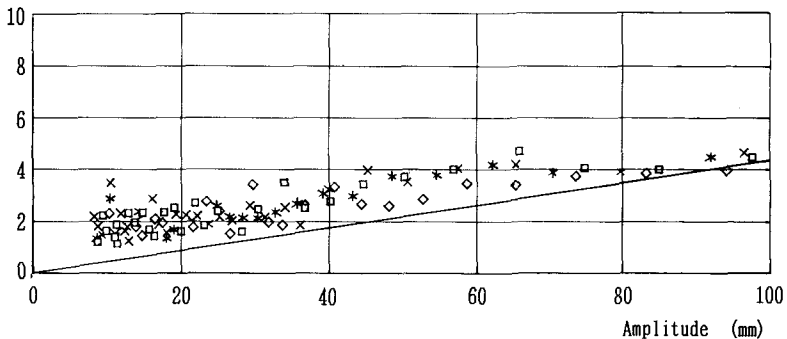
Damping

Ratio h %



Damping

Ratio h %



× ◻ * ◇ 4個の液柱管の実験値
—— (3)式から求めた理論値

図-5 T L C Dの振幅と減衰比の関係

4. 実験結果

4. 1 自由振動実験

自由振動実験によって得られた減衰波形の例を図-6に示す。TLCDを搭載しないときには、自由振動開始後200秒でも振動が継続しているが、TLCDを搭載したときには25秒程度で振動が収まり、非常にTLCDの減衰効果が大きいたことが分かる。このような自由振動波形から対数減衰率を求めたが、振幅依存性は小さかった。従って対数減衰率を一定とし、結果をまとめると表-2のようになる。表-2から言えることは次のような諸点である。

1) TLCDの制振効果

TLCDを搭載することによって、対数減衰率は非制振時の対数減衰率 $\delta_s = 0.003$ および $\delta_s = 0.008$ に対し、それぞれ最大0.120、および0.132となり、それぞれ40倍、16倍の値となることが確認された。

2) TLCDの最適パラメータ

TLCDを4個搭載したとき、初期振幅を5cmにして、TLCDの制振効果が最も大きくなる状態、すなわち最適状態は、オリフィスB（開口率74.7%、圧力損失係数 $\kappa = 1.369$ ）を用い、同調比を0.98に調整した場合であった。

3) オリフィスの影響

オリフィスBが最も制振効果が高く、Cはそれよりもやや低めであるが、ほぼ同じ制振効果があり、Aは開口率が小さく、減衰率が大き過ぎるため、制振効果が1/2程度になっている。

4) TLCDの質量効果

TLCDを2個搭載したとき（質量比0.015）と、TLCDを4個搭載したとき（質量比0.03）を較べると、2個のときの方が制振効果は小さい。しかし、TLCD2個搭載の場合でも、対数減衰率は最大 $\delta = 0.06$ が得られており、かなりの制振効果を示している。

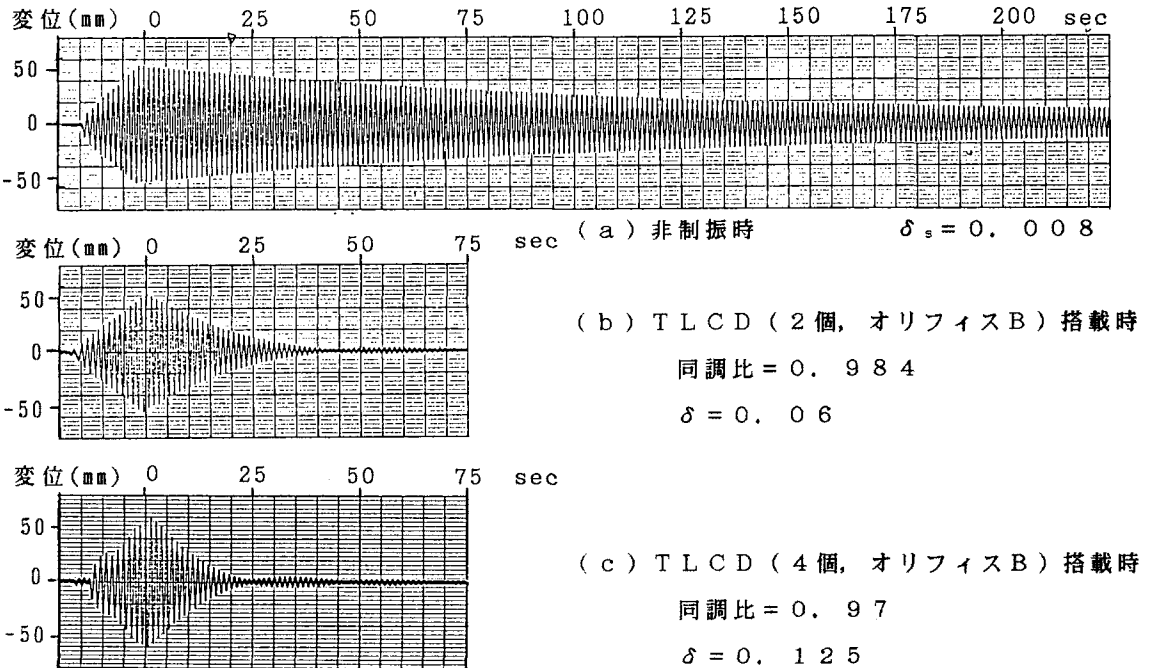


図-6 自由振動波形

表-2 自由振動から求めた対数減衰率 (初期変位レベル 50mm)

構造物減衰 オリフィス TLCD 同調比		$\delta_s = 0.003$			$\delta_s = 0.008$		
		A	B	C	A	B	C
4 個	0.960	0.053	-----	-----	-----	0.118	0.105
	0.970	0.054	0.120	0.102	0.081	0.125	0.124
	0.980	0.059	-----	-----	-----	0.132	0.119
	0.990	0.053	-----	-----	-----	-----	-----
2 個	0.984	0.026	-----	-----	-----	0.060	0.058

4. 2 定常加振実験

正弦波加振実験の結果得られた、構造物および液体の加速度、変位振動波形は、いずれもほとんど単一正弦波形であった。これらの振動数応答曲線を求めると、3種類のオリフィスの場合について、図-7、(a)、(b)、(c)のようになる。これより以下のことが分かる。

1) 実験値と理論値の対応

構造物単体およびTLCDとの連成系において、いずれのケースでも実験値は理論値ときわめてよく一致している。TLCDとの連成系においては、式(4)でCの振幅依存性を考慮して応答を求めているが、これにより構造物および液体の変位応答を正確に求めることができる。

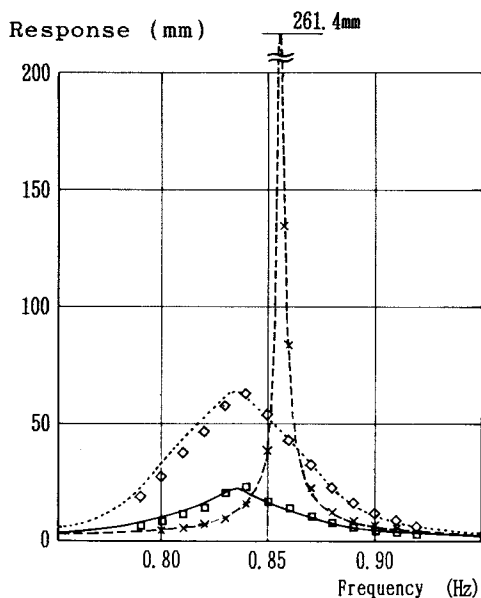
2) 制振効果

TLCDを搭載しない場合の構造物($\delta_s = 0.008$)の共振応答変位260mmは、TLCD4個を搭載することにより、16mm程度にまで抑制される。これより制振効果最大の場合は、振幅が1/16に減衰されている。

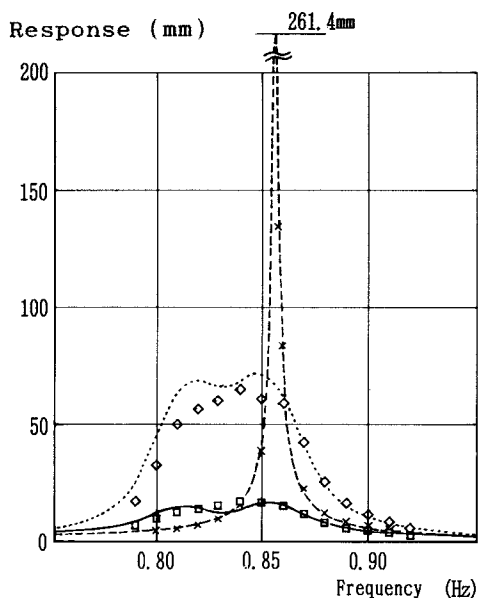
3) オリフィスの影響

オリフィスBの場合が最も効果があり、Cの場合は効果がやや低下する。しかし開口率がほぼ同じ両者はほぼ同程度の制振効果を発揮することが分かる。それに比べ、開口率の異なるAの場合は効果が低くなる。

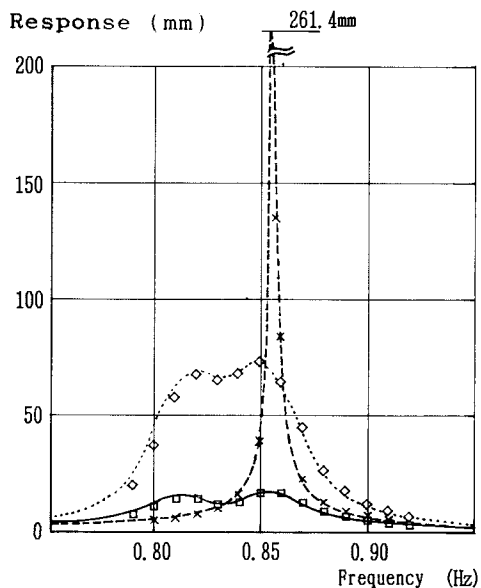
定常加振実験において、種々のパラメータを変えて、その影響を調べた結果をまとめて図-8に示す。図中、(a)はTLCDの質量比の影響、(b)は構造物自体の減衰による影響、(c)は同調比による影響、(d)はオリフィス開口率(圧力損失係数)による影響を示したものである。これらの結果より分かるのは、次の諸点である。



(a) オリフィス A



(c) オリフィス C

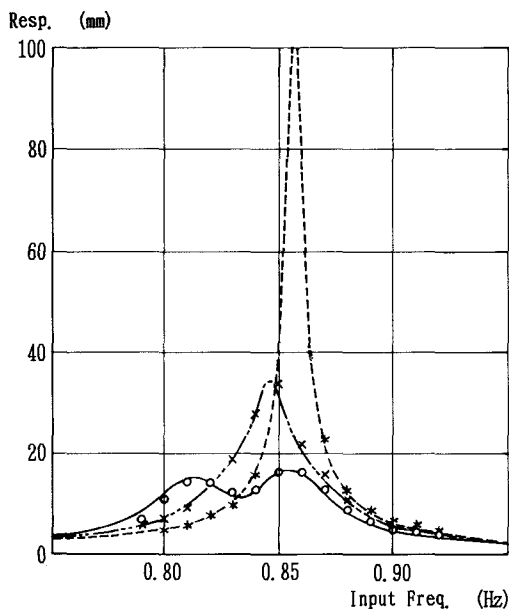


(b) オリフィス B

- | | |
|-------|-----------|
| 理論値 | |
| ---- | 非制振時構造物応答 |
| — | 制振時構造物応答 |
| | 制振時液位応答 |
| 実験値 | |
| x | 非制振時構造物応答 |
| □ | 制振時構造物応答 |
| ◇ | 制振時液位応答 |

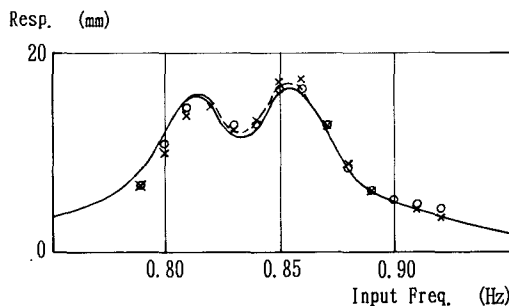
図-7 周波数応答曲線

(構造物減衰 $\delta = 0.008$, T L C D 4 個搭載, 同調比 0.97 , 加振力 14.3 N)



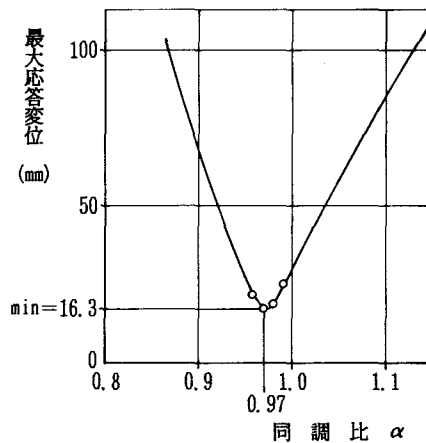
	理 論	実 験
$\mu = 0$	-----	*
$\mu = 0.03, \alpha = 0.970$	—————	○
$\mu = 0.015, \alpha = 0.984$	-----	×

(a) 質量比の相違による応答の変化



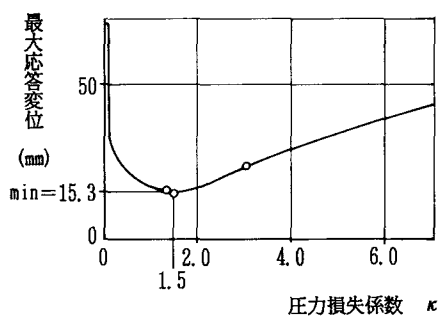
	理 論	実 験
$\delta_s = 0.003$	-----	×
$\delta_s = 0.008$	—————	○

(b) 構造物の減衰の相違による制振時応答の変化



(c) 同調比と最大応答変位

TLCD 4 個, $\mu = 0.03$
 $\kappa = 1.43$



(d) 圧力損失係数と最大応答変位

TLCD 4 個, $\mu = 0.03$
 $\alpha = 0.97$

図-8 諸パラメータの影響

- 1) いずれの結果においても、実験値は理論値ときわめてよく一致する。
- 2) T L C D 2 個の場合と 4 個の場合では、前者の制振効果は後者のその 1 / 2 程度になる。しかし、非制振時に比べれば振幅は 1 / 8 程度に低下しており、2 個の場合でも減衰性は高い。また、このとき用いられているオリフィスは、4 個のときに最適な開口率のものであり、2 個の場合に適切なオリフィスを用いるならば、制振効果をより高めることが、可能と思われる。
- 3) 構造物自体の減衰が $\delta_s = 0.008$ あるいは 0.003 と異なっても、同一の T L C D によって制振された結果はほぼ同一の応答となった。これは、いずれにしても構造物の減衰性が小さく、その差が大きな影響を及ぼさなかったものと思われる。
- 4) 同調比を最適の位置から変化させると、制振効果は若干減じるが、その変化の度合が数%の範囲であれば、その効果は急激に減じるものではない。
- 5) オリフィスの開口率（圧力損失係数）の最適値近傍の変化による影響も同様であり、最適開口率からややずれた開口率をもつオリフィス A の場合でも、1 / 8 程度の制振効果は確保されている。

5. まとめ

以上、実橋主塔の 1 / 10 相似模型を用いた構造物 - T L C D 連成振動実験により、以下の諸点が明確になった。

- 1) 著者らの提示している理論手法は、実験結果とよく対応し、これにより T L C D の制振効果を理論的に予測できる。
- 2) 本実験により種々のパラメータの影響とともに、T L C D の制振効果が確認された。本実験で得られた結果は、模型の相似性がほぼ充足されていることから、高い確度で実橋にも適用可能と考えられる。

6. 謝辞

本研究に際し、東京大学工学部総合試験所の藤野陽三助教授および同研究室の諸氏に多大のご指導とご協力をいただいた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) Modi, V.J. and Welt, F., "Vibration Control using Nutation Dampers", Proc. Int'l. Conf. on Flow Induced Vibrations, England, 1987.
- 2) 宮田利雄, 山田 均, 斎藤善昭, 「対風制振用水槽ダンパーの検討」, 日本風工学会誌, No.32, 1987.
- 3) 宮田利雄, 山田 均, 斎藤善昭, 「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.35A, 1988.
- 4) 藤野陽三, Pacheco, P., Chaiseri, P., 藤井邦雄, 「同調液体ダンパー (T L D) の基本特性に関する実験的検討 - 円筒容器の場合」, 構造工学論文集, Vol.34A, 1988.
- 5) 藤野陽三, Pacheco, P., 孫 利民, Chaiseri, P., 「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.35A, 1989.
- 6) 藤井邦雄, 佐藤孝典 他, 「液体のスロッシングを利用した制振装置 - Tuned Sloshing Damper について」, 日本建築学会学術講演会梗概集, 1987
- 7) 野路利幸 他, 「スロッシングを利用した制振装置の研究 (その 1 - その 3)」, 日本建築学会学術講演会梗概集, 1987

- 8)佐岡暖也，坂井藤一，高枝新伍，玉木利裕，「Tuned Liquid Column Damper（液柱管ダンパー）の制振効果について」，土木学会第34回年次講演会概要集，1988.
- 9)坂井藤一，高枝新伍，玉木利裕，「液柱管ダンパー（Tuned Liquid Column Damper）の提案－液柱管の振動特性」，構造工学論文集，Vol.35A，1989.
- 10)Sakai, F., Takaeda, S., and Tamaki, T., "Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations", Proc. Int'l. Conf. on Highrise Buildings, Nanjing, China, March, 1989.
- 11)渡辺四朗，「動揺軽減法（2）減揺水槽その他」，日本造船学会対航性に関するシンポジウム，1969.

（1989年10月2日受付）