

塔状構造物制振用水槽ダンパーの開発

Suppression of Tower-like Structures Vibration by Damping Effect of Sloshing Water Contained

宮田利雄* 山田 均** 斉藤善昭***

By Toshio MIYATA, Hitoshi YAMADA and Yoshiaki SAITOH

The paper presents the applicability to the vibration suppression in tower-like structures of a newly-developed damper, named a sloshing water damper, where the vibration energy is to be dissipated through breaking of sloshing water in a couple of appropriate containers. This damper was investigated and developed from viewpoints of its easy handling and effective capability for practical vibration problems of structures. The experimental works, together with an approximate theoretical study, showed that a good tuning, or coincidence of both frequencies of a structure and the sloshing water resulted in a rather high additional damping, and even a bit poor tuning made to a certain extent. The effectiveness was experimentally demonstrated in the suppression of a vortex-induced vibration of a suspension bridge tower model, tested in a wind tunnel. The practical application to huge high-rise structures may come to question in some cases in the installation of a set of damper containers.

1. まえがき

本研究の目的は、可撓性に富む構造物、特にここでは長大橋梁の主塔、高層ビル、展望塔などの塔状構造物を対象に、風、地震、あるいは据付機器などにより発生する振動を抑制、制振するための減衰装置として、取扱いが容易で、しかも効率が良いと考えられる水槽ダンパーの実用性を検討することにある。ここで、水槽ダンパーとは適当な大きさの水槽を構造物に搭載し、構造物の運動に伴う水槽内の水の砕波を含むスロッシング運動が構造物・水槽本体の運動と相対差を生じることによる減衰効果を応用するものである。

このような流体の運動を利用して減衰力を得る方法は今までにもいくつかの事例に見られ、ここで扱う種類のダンパーについても検討が行われたことがある^{1~4)}。いずれにしても、構造物の振動制振対策に関心を持つ技術者にとって大いに興味をそそられる問題であると言える。例えば、Modi³⁾は、人工衛星の運動制御をはじめとして風による構造体の振動制振に、液体のスロッシング運動を利用したダンパー（ニュートーション（章動）ダンパーと名づけた）を搭載し、効果をあげることが出来たと報告している。著者等も吊橋主塔の制振用にこの種のダンパー装置の利用を考えていたところであるが、この応用例に触発されて具体的な検討に着手した⁵⁾。さらに、実構造物への適用性などの諸問題についても検討を加え、考察した結果が本報告である。

* 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科土木工学教室 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

** 工博 同 助教授 同 上

*** 同 助手 同 上

2. 水槽ダンパーの特性と理論

建設構造工学におけるある躯体内の液体のスロッシング運動問題は、地震の作用下で躯体が受ける応答問題、あるいは液体の越流問題として大きな関心が払われてきた。ここで対象とする水槽ダンパー問題においては、いわば逆の発想の形で、搭載水槽内の水の砕波を含むスロッシング運動に伴うエネルギー消散によって水槽、すなわち構造物本体の振動減衰効果を生み出そうとする問題のとらえ方に立っている。このような液体の運動を応用した減衰効果を得ることができるとなると、液体の自由な運動応答特性を利用することによってより多面的な発展が期待できる。例えば、塔状構造物の風による振動を考えると、構造的には一つの振動モードのみならず、風速のわずかな高低により異なる2方向の並進、あるいは振れの3つの変位方向に、しかも異なる複数の振動数（低く、ある帯域幅に分布する）の振動を考慮する必要がある。ところが、このような振動の制振対策は、従来、長周期現象であるがために原理的に効率が悪く、大規模で精密な重い機構が必要となる、その適用は一つの振動モードのみを対象とし、微妙な調律を要する単能形の減衰装置となるなどの難点が存在している。この点、水の自由な運動応答性を利用することになる水槽ダンパーは作動振動数レンジを相対的に広げ得、複数の異なる振動モードに対し一つの装置でより効率的に対応することも可能になると期待される。

さて、どの程度の減衰効果が期待できるかであるが、制振すべき振動応答の例として風による塔状構造物の渦励振を想定すると、この場合の励振力の大きさが負の対数減衰率で $\delta_a = -0.1$ 程度であるので、搭載するダンパーにこの励振力を減殺する減衰力を付与させ得れば十分である。そこで、簡単な形状の長方形の水槽ダンパーを搭載し、水量を適宜変化させて減衰効果を比較、検討してみたところ、より効率的な形状は自由水面が相対的に大きく、水深の浅いものであった。このとき、水槽内の水が形成する波の特徴は構造物・水槽本体系の振動振幅に応じて異なっている。振動振幅がかなり小さい内は波高の低い重複波⁶⁾が水槽壁面で完全に反射しているのに対し、振動振幅が大きくなると共に波高が進行波の砕波限界を越え、衝撃性の砕波圧⁶⁾を壁面に作用するような状態に至っている。これに対し、水深の深いものでは、底層の水はほとんど動かず（固定水）、スロッシング運動する表層部分（自由水）と区別されるように見え、要するにある波高の重複波がかなり広い振動振幅の領域で観察されていた。

スロッシング運動する波の進行方向の水槽の長さ L と幅 B が等しい場合、幅を2倍にした場合の長方形の水槽に関する実験結果をまとめてみると、以下のような特性が見出される。Fig. 1に実験結果の例（ $B = 2L$ の場合）を示す。

- ①付与される減衰性は一般的に水槽本体の振動振幅 A によって変化する。厳密ではないが、重複波の生じている領域では付加減衰は小さく、砕波の発生する領域では大きくなると言うことができる。この傾向は水の総量 $m_w (=LBH)$ 、あるいは波の進行方向長さ L と水深 H の比 H/L によって変化するが、重複波、あるいは砕波の存在とこれらのパラメータとが強く関係し合うことを意味していると言える。
- ②水の総量 m_w が増しても必ずしも付加減衰性は大きくならず、長さ L に対して最適の水深比 H/L が存在している。この事実は砕波を含むスロッシング運動の固有振動数が構造物・水槽本体系の振動数と密接に関連して、高い付加減衰を生んでいることを物語っている。このとき、砕波の運動は本体系よりかなりの位相遅れをもち、水槽壁面にかなりの砕波圧を作用していると見ることができる（Fig. 2）。
- ③スロッシング運動する砕波を拡大するために水槽幅 B を2倍にすると（このとき、同じ水深とすれば水の総量も2倍となる）、付加減衰もおおむね2倍となる。もっとも、減衰率の増大は必ずしも幅 B に比例せず、また振動振幅との関係も非線形に変化しているようである。これは、ある幅の水槽内のスロッシング運動が完全に同相とはならず、幅方向に差異を持つためと考えられる。このようなことから、最適の幅と進行方向の長さの比 B/L が存在するように判断される。

いずれにせよ、このような減衰性を示した自由水面の広い長方形水槽の場合、水のスロッシング運動は砕波を含む浅水波の典型的な挙動を見せていたと考えることができる。そこで、剛体壁を有する長方形貯槽内の浅水波のスロッシング問題^{7, 8)}を参考にして、ここで扱われる現象を近似的に考察してみた。付加減衰が振動振幅によって変化する特性を記述することは難しいが、その他の実験上求められた特性、傾向を比較的良く説明できる関係式を導くことができる。すなわち、構造物・水槽本体系の運動に伴いスロッシング運動する砕波が位相遅れをもって水槽壁面に当り、衝撃的な水圧力を及ぼすと考えて、いわば線形関係の仮定のもとに第1次近似として、本体系への付加減衰が等価対数減衰率の形で、

$$\delta_{eq} = \frac{8}{\pi} \left(\frac{m_w}{M_s} \right) \left(\frac{L}{\pi H} \right) \tanh \left(\frac{\pi H}{L} \right) \sin \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{2h_w(f_s/f_w)}{1-(f_s/f_w)^2} \right\} \right] / \sqrt{\{1-(f_s/f_w)^2\}^2 + 4h_w^2(f_s/f_w)^2} \dots (1)$$

のように与えられる。ここで、 m_w/M_s は水槽内の水の質量($m_w = LBH$)と構造物・水槽本体系の質量 M_s (又は等価質量)との比、 f_s は本体系の振動数、 h_w はスロッシング運動する波の減衰比、 f_w は波のスロッシング振動数で、浅水波の第1次固有振動数を考えると、

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh \left(\frac{\pi H}{L} \right)} \dots (2)$$

によって与えられる。ここで、 H/L は水深比、 L は波の進行方向の長さ、 g は重力加速度である。

式(1)で与えられる付加減衰 δ_{eq} は、考察の前提どおり、本体系の運動に対して砕波を含むスロッシング運動が位相遅れをもち、すなわち波の減衰比 h_w が大きく、しかも本体系の振動数 f_s に波の固有振動数 f_w が近づけば大きな値となることが分る。また、質量比 m_w/M_s が大きくなれば δ_{eq} が大きくなることも明らかである。ただし、水槽中の水が全量有効に働くとき、 $m_w = LBH$ であるので、 δ_{eq} は結局 L^2B に比例することにもなる。これらの特性、傾向は、実験結果に認められた上述の特性、傾向に良く合致するものと見ることが出来る。すなわち、式(2)で与えられる波の固有振動数は波の進行方向の水槽長さ L と水深比 H/L によって決められるが、実験において効果的な付加減衰が得られるためには、ある大きさの L に対して最適な水深比を選択する必要があること、要するに、本体系の振動数と波の振動数を近づけることが効果的であったことに継がっている。また、波の減衰比 h_w については、付加減衰が大きいときに本体系の振動減衰は早く、その際の水槽内の砕波のスロッシング運動の減衰もきわめて早い実験事実が認められるので、本来かなりの大きさを持つと考えても妥当性は失われず、従って、かなりの付加減衰を生むことに継ぐと言える。質量比の増大効果は、水槽幅を2倍にすることによって増大させたとき、付加減衰がほぼ2倍となった事実から明らかである。

いずれにせよ、Fig. 1に示した実験結果を見ると、0.7%程度の質量比のとき、相当な大きさの振動振幅領域で $\delta_{eq} > 0.1$ となっており、前述した風による渦励振における励振力($\delta_a = -0.1$)を十分に減殺し得る大きさである。このことは、ここで扱う水槽ダンパーが制振対策の一方法として十分な有効性をもつことを示している。ところが、この水槽ダンパーはその有効性を発揮するために、構造物・水槽系の振動数にスロッシング振動数を近づけることが一つの条件として求められるので、この意味では、従来から有効な対策の一つといわれてきた動吸振器(TMD)における振動数同調(調律)と同じ調律を必要とするダンパーに分類される。しかしながら、Fig. 1に示した実験結果にも見られるように、相当の大きさの振動振幅領域での付加減衰 δ_{eq} への水深比 H/L (すなわち、波の固有振動数)の影響はかなり緩やかで、厳しい振動数同調(調律)を必ずしも必要としないことが分る。このような有効な振動数領域に幅を持つことがこの水槽ダンパーの特徴であるとも言え、前述したような相対的に広い作動振動数レンジに適用できる有意性を持っている。

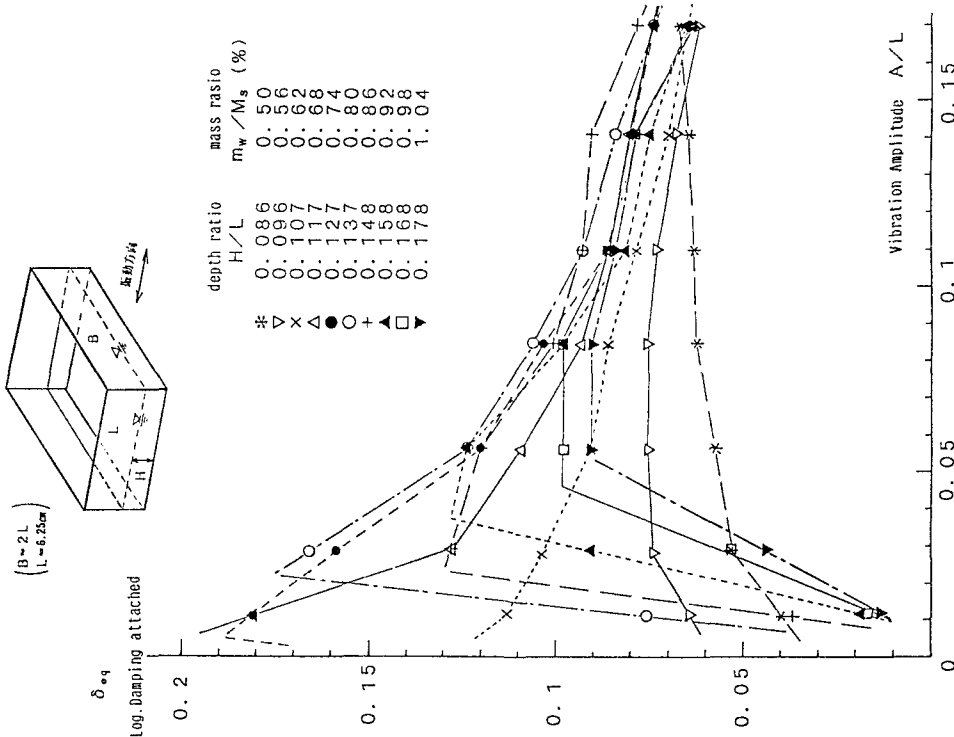


Fig. 1 水槽ダンパーによる付加減衰と振動振幅の関係 (実線)

Table 1 水槽ダンパーの水深比 H/L , 質量比 m_w/M_s と付加減衰 (対数) 率 δ_{eq} (実験) : $f_s=0.63$ Hz ($L=22.6$ cm)

水深比 H/L	質量比 m_w/M_s (%)	式(2)による f_w (Hz)	振動振幅 A/L				
			0.066	0.055	0.044	0.033	0.022
0.0196	0.27	0.46	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
0.0245	0.33	0.52	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
0.0294	0.40	0.56	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09
0.0343	0.47	0.61	0.06	0.06	0.07	0.08	0.12
0.0392	0.54	0.65	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10
0.0441	0.60	0.69	0.05	0.06	0.07	0.08	0.15
0.0490	0.67	0.73	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10
0.0587	0.80	0.79	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05
0.0685	0.94	0.86	0.05	0.05	0.05	0.04	0.02

Table 2 水槽ダンパーの水深比 H/L , 質量比 m_w/M_s と付加減衰 (対数) 率 δ_{eq} (実験) : $f_s=0.89$ Hz ($L=22.6$ cm)

水深比 H/L	質量比 m_w/M_s (%)	式(2)による f_w (Hz)	振動振幅 A/L				
			0.066	0.055	0.044	0.033	0.022
0.0196	0.28	0.46	0.03	0.03	0.02	0.01	0
0.0294	0.42	0.56	0.05	0.05	0.05	0.04	0.01
0.0392	0.55	0.65	0.07	0.07	0.07	0.07	0.01
0.0490	0.69	0.73	0.08	0.09	0.10	0.12	0.07
0.0587	0.83	0.79	0.08	0.09	0.10	0.12	0.15
0.0685	0.97	0.86	0.08	0.09	0.10	0.13	0.17
0.0783	1.11	0.91	0.10	0.10	0.12	0.14	0.17
0.0881	1.25	0.97	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16
0.0979	1.39	1.02	0.09	0.10	0.12	0.12	0.15
0.1175	1.66	1.11	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09
0.1762	2.49	1.32	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01

3. 水槽ダンパーの応用

実際の構造物にこの水槽ダンパーを応用するについて、その有効性を発揮するためのパラメータの設定法、いわばダンパーの計画法、ならびにその有意性を実証するための一つの風洞試験結果、そして実構造物への応用開発の検討例を述べる。

3.1 水槽ダンパーの計画

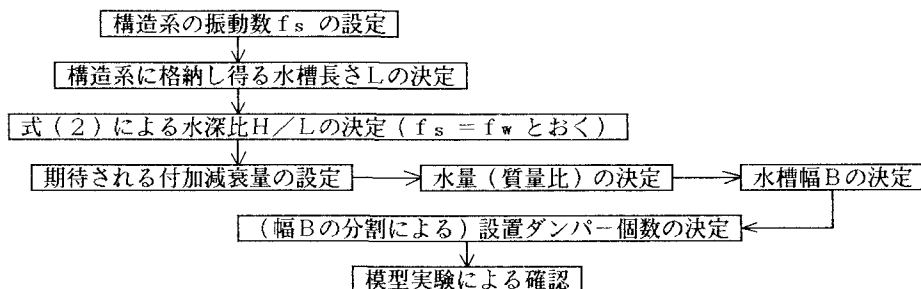
前項に述べたように、ここで対象とする水槽ダンパーの特性には複雑な背景が認められる。そこで、もう少し実験データを積み重ねることとして、波の進行方向の長さ L をFig. 1の例より長く取った場合の例を以下に示す。

Table 1, 2は構造系の振動数 f_s が異なる2つの場合の質量比 m_w/M_s 、水深比 H/L 、振動振幅 A/L の違いに対する付加減衰（対数減衰率） δ_{eq} の実験値を比較したものである。同表には、式（2）から算出される波の1次固有振動数相当値 f_w を併記してある。また、Fig. 3は同じ実験データ群に対する、ある振動振幅 A/L に着目した際の水深比 H/L と付加減衰 δ_{eq} の関係を f_s を違えて見たものである。

これらの一連の実験結果から、すでに前項で述べたところと重なる部分もあるが、次のような特性、傾向が見出される。

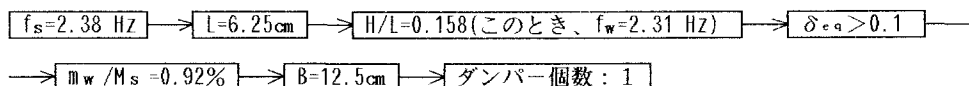
- ①ある一つの構造系の振動数 f_s の場合に、一般的には、水槽の水量を増すと付加減衰は増大するが、ある量を境に付加減衰は減少する。
- ②ある一つの f_s の場合に、水槽長さ L を定めると付加減衰が最も大きくなる最適水深比 H/L が存在する。これは、 L と H/L によって定まる波の1次固有振動数が f_s に同調した結果と考えられる。波の1次固有振動数は式（2）によって算出される f_w 値で近似できる。
- ③ある一つの f_s の場合に、ある水量以上では水槽長さを $1/2$ 倍、あるいは2倍とした際の波の1次固有振動数に同調した結果と考えられる付加減衰が小さいけれど、ピークを示す。

これらの事実から、水槽ダンパーを計画する際に、有効に作動させるための手順として、次のようなステップが考えられる。すなわち、



3.2 風洞試験による検証例

ここで、吊橋主塔模型を用いて、風によって発生する渦励振の制振にこの水槽ダンパーを応用した結果を示す。Fig. 4は一樣気流中で観測された渦励振の応答例で、風速 U_r に対する塔頂振幅 A/D 図を示す。このような応答の制振のために選択された水槽ダンパーのパラメータは、上述の計画ステップに従って次のように定められた。すなわち、水槽ダンパーは塔頂水平材に格納することを条件として、



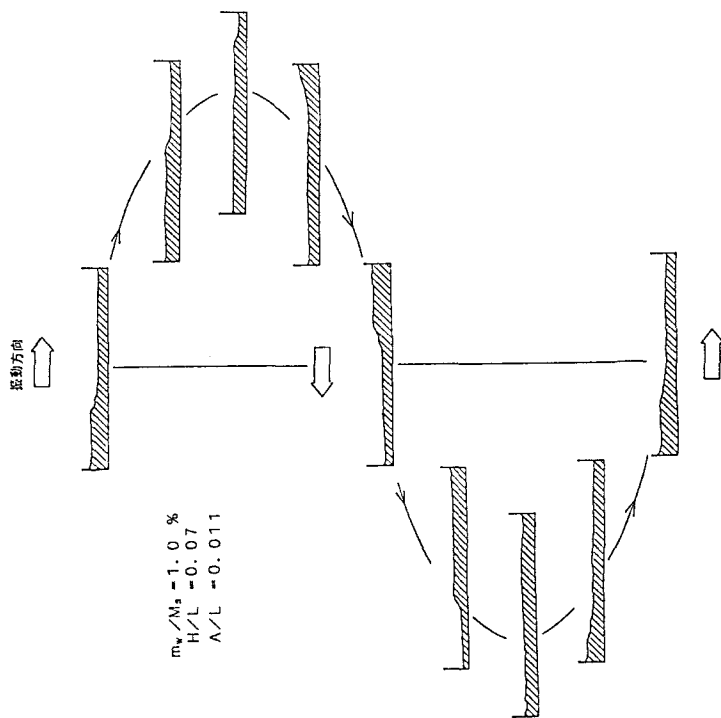


Fig. 2 一周期間の碎波の運動変化の例 (最適水深時)

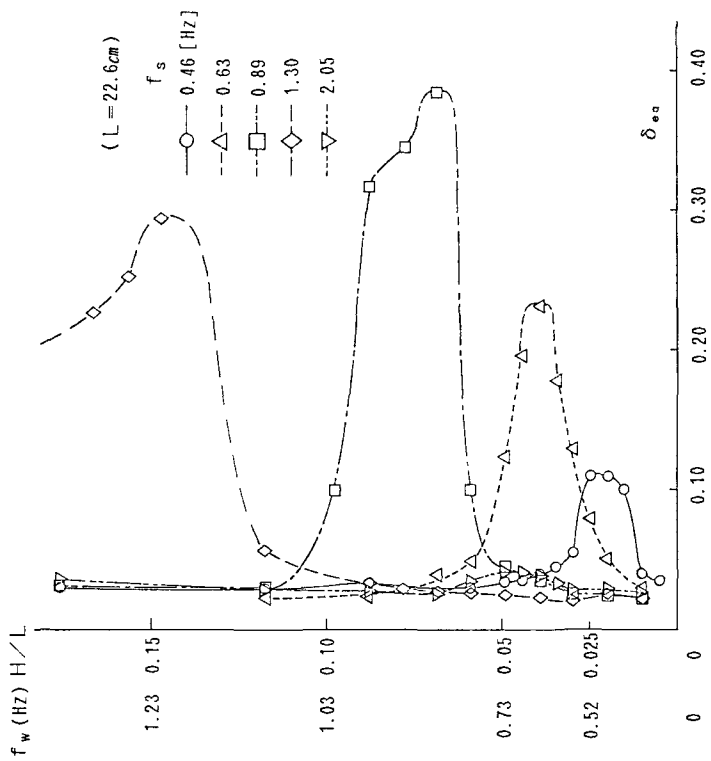


Fig. 3 水深比 H/L と δ_w の関係 (実験); $A/L = 0.0044$

となる。このとき得られた付加減衰 δ_{eq} はFig. 5に併記したとおりである。なお、比較のために、水量を $m_w/M_s = 0.5\%$ にはほぼ半減した場合についても実験している。このとき、式(2)によると $f_w = 1.81\text{ Hz}$ となり、 $f_s = 2.38\text{ Hz}$ に対してかなり離れることになる。

Fig. 5から明らかなとおり、質量比 0.92% のダンパーでは完全に渦励振応答が制振されている。一方、質量比 0.5% のダンパーでは振動数同調(調律)は十分とは言えないものの制振効果は小さくない。ただし、完全には制振し切っておらず、これを許容し得るか否かは構造設計との関連から判断されるべきところであろう。

3.3 実構造物への応用例

実際の塔状構造物に水槽ダンパーを搭載する場合にその規模などについて検討した例を示す。塔状構造物は本来揺み易く、振動問題についても構造設計、使用性などの観点から制振対策を施す必要がしばしば生じる。Fig. 6は長大橋梁の塔、高層ビルなどの塔状構造物の高さ h と面外たわみ1次固有振動数 f_s の関係を調べて、図示したものである。おおよそ、塔高 $h = 100\text{ m}$ を越えると $f_s = 0.35\text{ Hz}$ を下回り、 $h = 300\text{ m}$ を越えると 0.1 Hz 余のオーダーではほぼ一定となるようである。これに対して、水槽ダンパーの波の1次固有振動数 f_w は適切な水槽長さ L と水深比 H/L を定めると、式(2)からFig. 7のようなオーダーのものとなる。

このような構造物に水槽ダンパーを計画するとき、それぞれの断面寸法は千差万別であるから、搭載できる水槽の大きさも異なったものとなる。ただし、前述のダンパー計画ステップに従うと、基本的には、ダンパーを格納できるスペースが広くて水槽長さ L が大きく採れると、質量比を一定としたとき、必要な水槽幅 B は小さくて済むことになる。一つの例として、塔高約 300 m の長大吊橋の主塔(全重量約 $25,000\text{ t}$)を対象を考える⁹⁾。片側の塔脚の断面寸法はFig. 8(a)のようである。いま、水槽をこの塔脚の中に搭載することとし、振動方向の水槽長さを $L = 6\text{ m}$ にとると、 $f_s \approx 0.13\text{ Hz}$ であるので、最適水深比は $H/L = 0.042$ と求められる。このとき、水深は $H = 25.2\text{ cm}$ となる。仮に、質量比 m_w/M_s を 0.5% にとると、総水量 125 t を納めるために必要な水槽幅は $B = 82\text{ m}$ となる。これをFig. 8(a)、(b)のように分割して格納するとすれば、図示するような形状の水槽を片側塔脚に16段重ねれば条件を満たすことができる。このようなダンパーが実際の設計、施工、維持管理の場において受入れられるのか、またその効果は期待どおりであるのかは現在検討中であり、次の機会に報告することとしたい。

4. あとがき

本研究において、塔状構造物に発生する振動の制振対策として、取扱いが容易で、効率が良いと考えられた水槽ダンパーの実用性を検討した。その結果、適切なパラメータの設定により有意な付加減衰性を得ることができることはもとより、さほど厳しい条件を課さなくともある程度の効果を期待できることが示され、これらの有効性は風による渦励振の制振において実証された。実際の構造物への応用については、ダンパー計画、すなわちパラメータ設定の検討結果の例を示したにとどまり、今後、設計、施工、維持管理における問題、その有効性の確認について検討する必要がある。

前述したとおり、この種のダンパー開発は振動制振対策に関心を持つ技術者にとっておおいに興味をそえられる問題である。従って、本研究に並行する形で同じような検討が実施されている^{10~13)}。しかし、現時点では、そのメカニズムの理解、解析は必ずしも完全ではなく、実験データの蓄積という点においてもなお不十分のところが少なくない。今後に待つべきところが多いと言うべきである。著者らも、上述した長大構造物への応用を最大目標に据えた研究を継続中である。

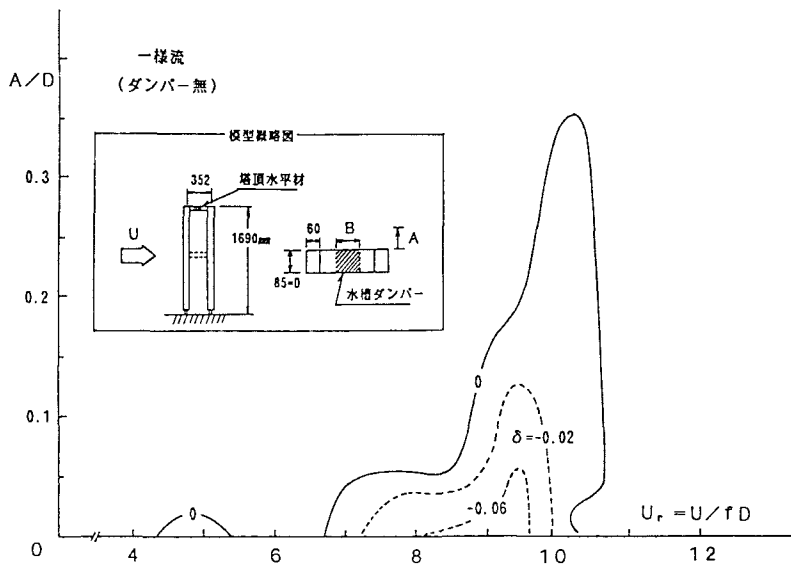


Fig. 4 吊橋主塔の渦動振に関する風洞試験結果（風速－振幅－空力減衰 図）

塔固有，ダンパーによる付加減衰率（対数）比較表 [$f_s = 2.38$ Hz, $L = 6.25$ cm]

塔頂振幅 A/D	0.29	0.18	0.06	0.047	0.035	0.012	0.006	式(2) による f_w
塔のみ	0.0099	0.0086	0.0048	0.0039	0.0037	0.0031	0.0029	—————
質量比 0.5 %	0.023	0.036	0.096	0.110	0.096	0.054	0.034	1.81 Hz
質量比 0.92%	0.034	0.055	0.156	0.178	0.201	0.263	0.319	2.31 Hz

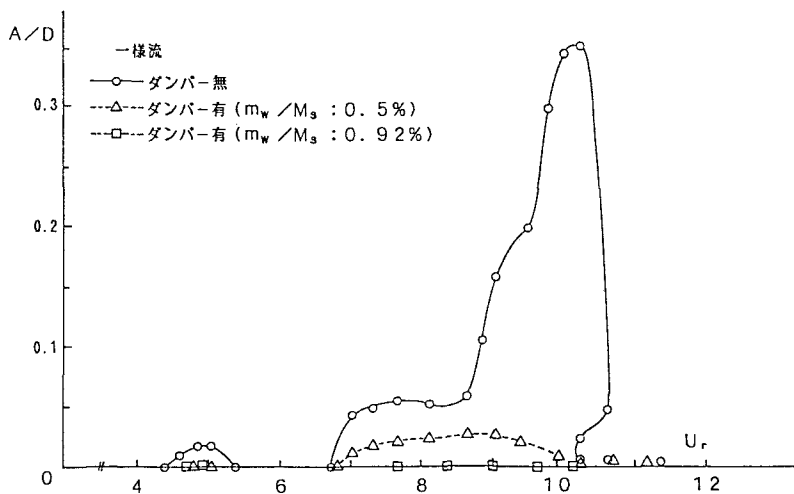


Fig. 5 吊橋主塔の風洞試験結果（風速－振幅 図）

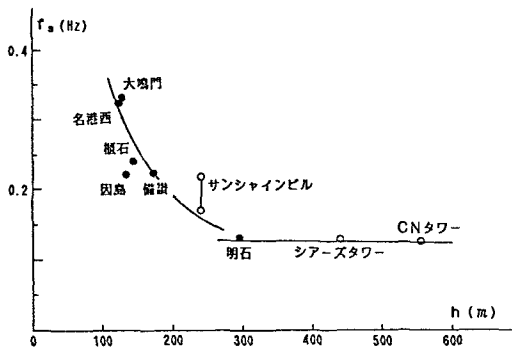


Fig. 6 塔状構造物の面外たわみ1次固有振動数と塔高

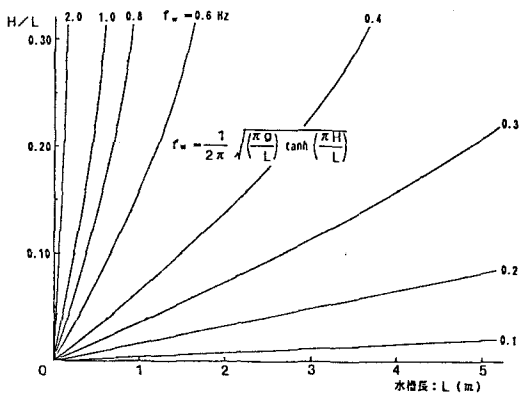


Fig. 7 水深比・水槽長一波の1次固有振動数の関係図

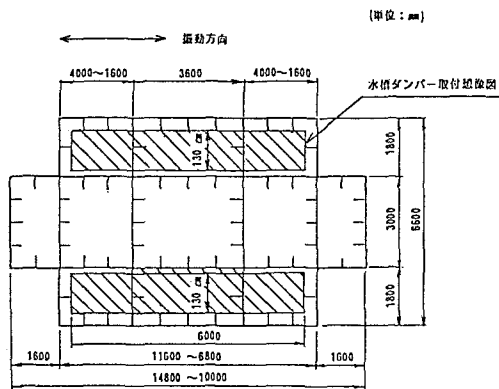


Fig. 8 (a) 長大吊橋主塔 (塔高 $h=300\text{m}$) の塔脚断面

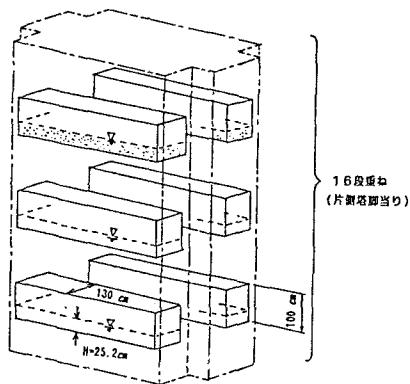


Fig. 8 (b) 吊橋主塔における水槽ダンパー取付想像図

参考文献

- 1) Miles, J.W.: Ring Damper of Free Surface Oscillations in a Circular Tank, ASME, J. Applied Mechanics, June 1958.
- 2) Bauer, H.F.: Oscillations of Immissile Liquids in a Rectangular Container ; a New Damper for Excited Structures, J. Sound and Vibration, Vol.93, No.1, 1984.
- 3) Modi, V. J.: 昭和61年7月23日の土木学会における講演.
- 4) 松浦義一、松本互平 他: 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年11月.
- 5) 宮田利雄、山田 均、斉藤善昭: 耐風制振用水槽ダンパーの検討、日本風工学会誌、No.32、昭和62年5月.
- 6) 例えば、堀川清司: 海岸工学、東京大学出版会、pp.75 ~76、1973.
- 7) 例えば、土木学会、土木技術者のための振動便覧、第2版、第11章 水による振動、pp.414~416、1985.
- 8) Housner, C.W.: Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bull. Seismological Society of America, 1957.
- 9) 宮田利雄、宮崎正男、斉藤善昭: 超高層吊橋主塔の耐風性に関する一実験、日本風工学会誌、No.24、昭和60年6月.
- 10) Modi, V. J. and Welt, F.: Vibration Control Using Nutation Dampers, Proc. Int. Conf. Flow Induced Vibrations (England), May 1987 ; Damping of Wind Induced Oscillations Through Liquid Sloshing, Proc. 7th Int. Conf. Wind Engineering (West Germany), July, 1987.
- 11) Sato, T.: Tuned Sloshing Damper、日本風工学会誌、No.32、昭和62年5月;
藤井邦雄、佐藤孝典 他: 液体のスロッシングを利用した制御装置—Tuned Sloshing Damper について、日本建築学会大会集、昭和62年10月.
- 12) Chaiser, P., Y. Fujino and B. Pacheco: Damper Using Liquid Motion As Energy Dissipator — Tuned Sloshing Damper、土木学会第42回年講、昭和62年9月.
- 13) 田村幸雄 他: 空港管制塔の風による応答(その2 制御装置の効果)、日本建築学会大会集、昭和62年10月.

(1987年10月16日受付)