

長方形水槽ダンパー適用に関する諸問題の検討
FEASIBILITY STUDY OF THE SLOSHING DAMPER SYSTEM
USING RECTANGULAR CONTAINERS

宮田 利雄*、山田 均**、斎藤 善昭***

By Toshio MIYATA, Hitoshi YAMADA and Yoshiaki SAITOH

A demand for development of an effective damper system increases to suppress vibrations of tower-shaped structures and so on. The sloshing damper is one of the solutions and expected as an easily maintained system. However looking at its feasibility there are still some problems. First it is not easy to estimate its damping capability because mechanism of the sloshing damper is mainly based on breaking bore. Secondly there is almost no discussion on optimum dimensions of containers, especially on their depth and relation between depth of the container and depth of the contained water. In this paper one approximate estimation of its damping capability is proposed. From a viewpoint of efficiency of the damper system the minimum depth of container is experimentally investigated.

1. まえがき

構造物がたわみ易くなるにつれ、種々の原因による振動への対処が要求されており、対策の一つとしてダンパーシステムが検討される機会が多くなっている。塔状構造物の風による振動問題対処としては、構造物の付近に固定点が取れる場合で、かつ短期的な対策としてはケーブルなどで構造物の外部の減衰装置を利用する場合が多く見られる一方で、固定点が取れない場合、また比較的長期的な対策とする場合にはTMDに代表される構造物内部に挿入されるダンパーシステムが使用されることが多いように思われる。構造物が供用される非常に長い期間を想定すると、ここで問題となることは、減衰装置がメンテナンスフリーでかつ、微小な振動振幅に対して確実に作動することである。主構造系の固有振動数がかなり低くなることが主たる理由で、要求を満たす減衰装置の設計は容易ではない。このため新たな減衰システム開発に対する要求がますます強くなっている様に思われる。本論文で扱う水槽ダンパーは船体の動揺対策、洗濯機の振動防止策に用いられているものと基本的には同じものであり、原理的にはさほど新しいものではない。しかし、土木構造物に適用したModiの先駆的な研究¹⁾を始めとして、最近の塔状構造物の振動減衰の要求の増加にともない様々な機会に多くの議論^{2), 3), 4), 7)}がニューテーションダンパー、アクアダンパー、TL(Liquid)D、TS(Sloshing)D、TLC(Liquid Column)D等の名前の下にダンパー系としての砕波を始めとするエネルギー散逸機構に着目した減衰原理、水槽の形状、実際の構造物への適用等についてなされている。著者

* 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 横浜国立大学助教授 同上

*** 横浜国立大学助手 同上

らも、スロッシングと碎波の複合的なメカニズムを持つ水深の小さい水槽ダンパーシステムについて渦励振の制振を目的とし吊形式橋梁主塔への適用を想定して実験を実施し、その結果を報告してきた⁵⁾。種々の報告にある研究成果を要約すると、次のようになる。

- 1) 水槽ダンパーでの付加減衰性能は有効な量が得られるが、振動振幅に対し非線形な特性を示す。このとき、比較的小さな振幅で比較的大きな付加減衰量が得られることが特徴である。
- 2) 水槽ダンパーの力学モデルとして、質量減衰器 TMD と同様な付加系に減衰を含む二自由度振動系モデルが提案されている。
- 3) 付加される水槽内の液体のスロッシング固有振動数の主構造物の固有振動数との調律はより効果的な付加減衰量を生む。しかし、TMD モデルよりも有効な減衰量を付与し得る周波数範囲は若干ではあるが広いようである。

以上のような水槽ダンパーの特性の理解にたち、本論文では、長方形の水槽を使用した水槽ダンパーについて、水槽ダンパーを設計する際に問題となるとと思われる減衰性能の推定、設置上の配置問題の二つの点について、水槽ダンパーの減衰性能の近似推定式とその適用性、水槽ダンパーの分割設置、水槽ダンパーの容器の高さのコントロールについて検討を実施した。

2. 水槽ダンパー適用上の諸問題と対処

2. 1 近似式による減衰性能推定

水槽ダンパーの設計に当たり、実務的な興味は所要の減衰量に対し必要とされる水槽ダンパーの構成はどの程度かという点であろう。水槽ダンパーの力学モデルは TMD と同様な二自由度系モデルが提案されており、更に詳細には長方形水槽内の液体の挙動について波のエネルギー損失にも着目して細かな計算を基にした推定が行なわれ大きな成果を得ている³⁾。ここでは煩雑な数値解析を嫌い、まず一次近似式を導くことを目的とした。水槽全体が定常振動する下で、水槽内の水がスロッシング振動する状況を想定すると、若干の近似の後、図 1 のようなベースシアに着目してスロッシング振動の反力を等価な減衰力に置き換えることにより付加減衰量について以下の推定式が導かれる⁵⁾。

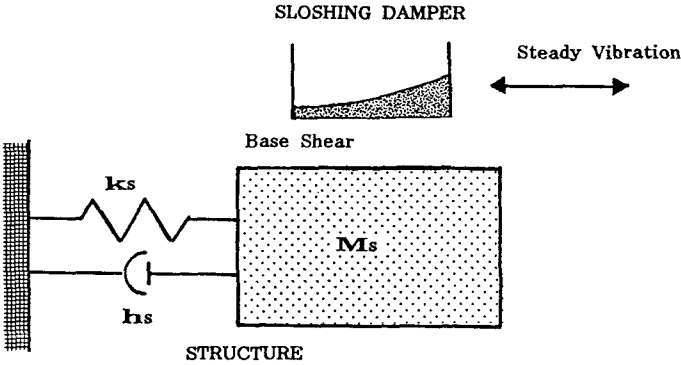


Figure 1 Illustration of analytical model for equivalent damping

$$\delta_{E0} = \frac{8}{\pi} \left(\frac{m_w}{M_s} \right) \left(\frac{L}{\pi H} \right) \tanh \left(\frac{\pi H}{L} \right) \sin \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{2h_w(f_s/f_w)}{1-(f_s/f_w)^2} \right\} \right] / \sqrt{\{1-(f_s/f_w)^2\}^2 + 4h_w^2(f_s/f_w)^2} \quad \dots (1)$$

ここで

δ_{E0} : 水槽ダンパーによる付加減衰（対数減衰率）
 m_w : 水槽内の液体の質量
 M_s : モードを考慮した主構造系の一般化質量
 H : 水槽内の液体の深さ
 L : 水槽の長さ
 h_w : スロッシング運動に期待される減衰率（減衰比）
 f_s, f_w : 主構造系、スロッシングの固有振動数
 長方形容器内のスロッシングの一次固有振動数は次の式で与えられる⁶⁾。

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

式（１）を見ると、式中に未知数としてスロッシングの減衰率 h_w を含んでいる。したがって、式（１）の適用をはかる上でのパラメータはその減衰率の設定にあり、砕波を含むスロッシングの減衰率の推定精度が式（１）のあてはまりの度合を決めることとなる。以上の関係を検証するために、２種類の水槽モデルと塔状構造物のモデルを設定し、振動実験を実施した。図２にモデルの概要を示すように、１つめのモデルはある斜張橋の主塔モデルであり、付加した水槽は振動方向と同程度の幅を持つものとその倍の幅を持つものの２種類である。このモデルでは水槽は頂部ではなく中間部の水平材位置に設置した。一方、２つめのモデルは、振動質量調節のために頂部近傍に質量を付加した鋼棒の頂部に水槽を設置したものであり、さらに塔基部の支持位置を変えることにより主構造系の固有振動数を調整することができる。いずれの場合も付与する水量を調整することにより水深を変え、スロッシングの固有振動数を調節した。

観測結果の一例を図３に示す。既に多くの報告で明らかになっているように、この水槽ダンパーシステムでは付加減衰性能が大きく振動振幅に依存しており、振幅に対し非線形な減衰特性を示す。また、振動数の調律により付加される減衰量は大きくなり、特に小さい振動振幅に対し増加する。

振動振幅が水槽の振動方向に２％程度の位置に着目し、水槽位置で１となるような振動モードから得られる一般化質量を基に付加減衰観測結果を整理したものを図４及び５に示す。いずれの場合も、スロッシング振動の固有振動数と主構造系の固有振動数が一致した場合に大きな付加減衰量が得られることは明らかに実験結果が示している。整理した結果によれば式（１）の前半部分で与えられる水槽中の水の振動の質量寄与の効果、更に後半部分の周波数応答の特性も、図中の測定データをよく説明しており妥当に評価されているとみることができよう。

図中に、描き加えた実線は式（１）でスロッシングの減衰量を $h_w=10\%$ 及び 5% としたものであり、水槽の寸法、主構造系のモデル、を問わずそれらの値付近に観測値が散らばっており、 $h_w=10\%$ 程度で若干実験値より下目の推定値を与えているようである。式（１）は線形関係より得られたものであるから、当然非線形な現象を詳細に表現することはできない。しかし、図４及び図５を見る限り、代表する振動振幅を適当に設定することによりスロッシングによる付加減衰現象の１次近似的な定量的特性は表現されている。詳細には別途の検討が必要になるだろうが、水槽ダンパーの設計上の概略的な指標として十分に有効であると考えられる。

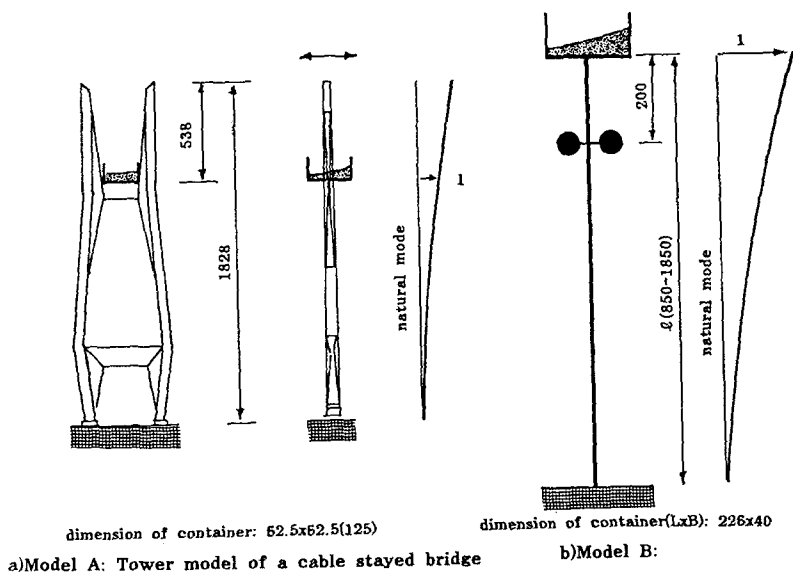


Figure 2 Two structure models and the sloshing dampers

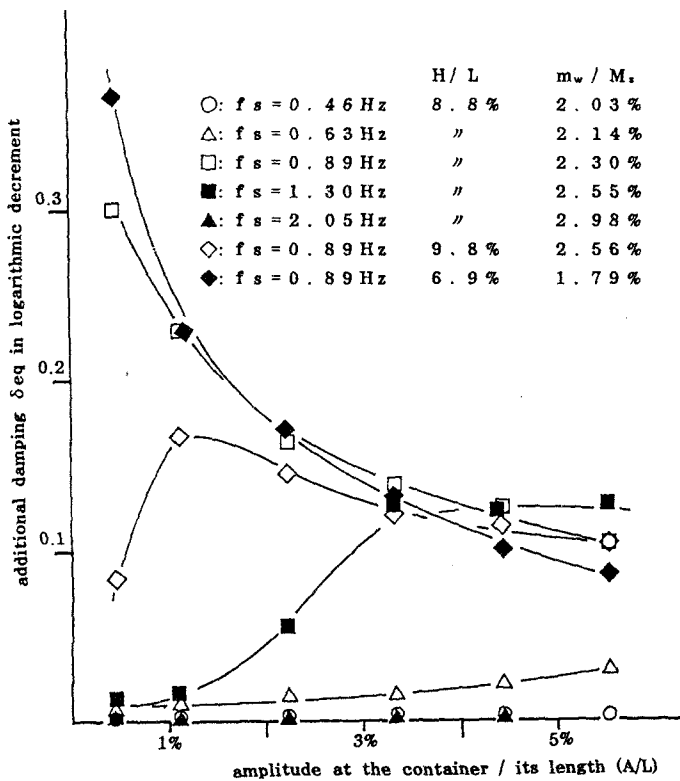


Figure 3 One example of damping characteristics(Model A)

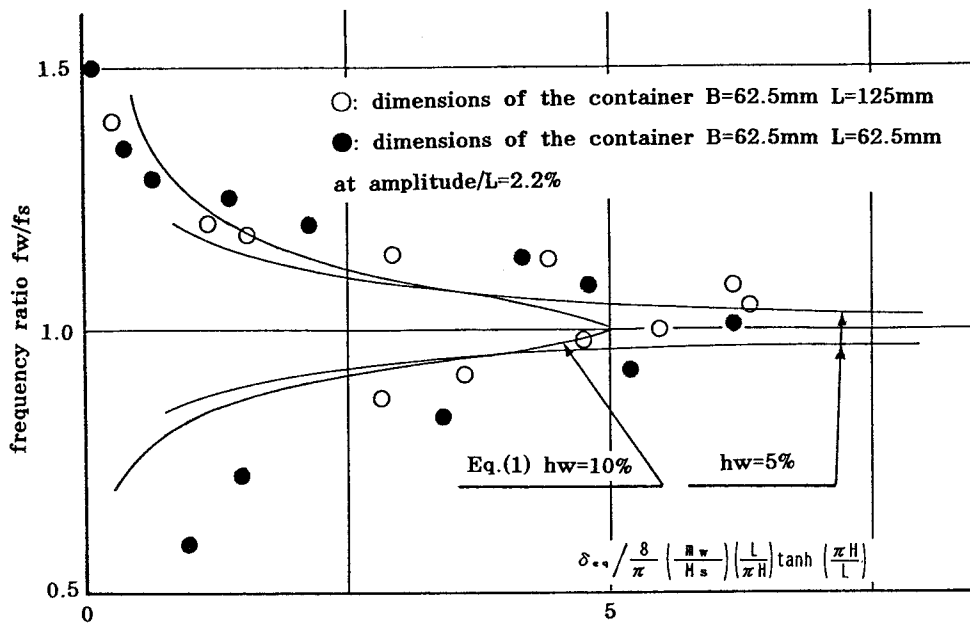


Figure 4 Normalized damping capability of model A

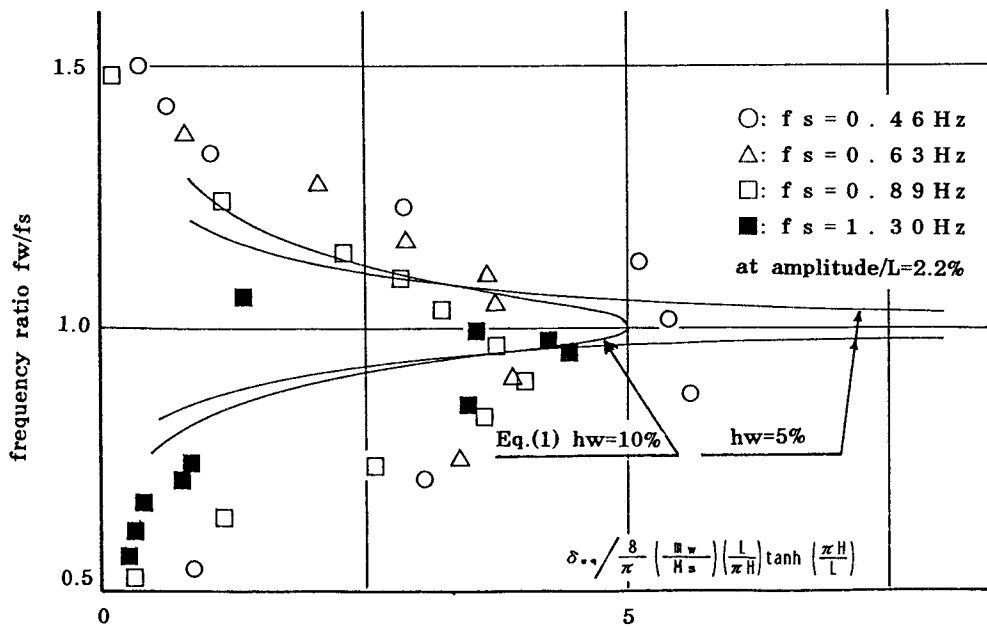


Figure 5 Normalized damping capability of model B

2. 2 分割設置と波返し板の設置による減衰性能について

主構造を塔状のものとし、水槽を頂部に設置するとすると、水槽ダンパーに与えられる水量はほぼ主構造の総重量の1%程度あるいはそれ以下となり、その量は決して大きなものではない⁵⁾。しかし、具体的な取り付けを想定すると、構造物の内部の余裕空間は限られており、寸法上の制約が非常に大きくなることが予想される。寸法の制約の帰結は、水槽の分割配置、高さの制限になろう⁵⁾。以下、水槽を分割した場合、及び、水槽の高さを制約した場合についての検討結果について述べることにする。

式(1)が有効であるとすれば、例えば同じ水量、同じ寸法の水槽を主構造に付与した場合、2つ設置したものは1つのものの2倍の減衰量が得られることになる。分割数の問題はスロッシングへの容器壁面摩擦の効果の配慮が別途必要となるが、容器分割数が極端に多くない場合で壁面摩擦の影響が顕著に現われない範囲ならば、これを分割配置に拡張することができ、配置を分割して同等の作用が得られることになる。実験は、図2に示したモデルBに対し同寸法の水槽を複数与えることにより、水槽数と付加減衰量との関係を調べた。図6に結果を示すように、水槽数の増加により系全体の固有振動数が変化し、最大減衰量が得られる水槽内の水の水深が変化してはいるが、ほぼ付与される減衰量は水槽数に比例して増加していることが分かる。

さて、水槽が高さ方向に制限された場合の効果は、主構造の振動に伴って発生するスロッシング波頭が水槽の天井により制限され、波の打ち上げ高さが抑制されることで置き換えられよう。ここでは、図2に示したモデル2の構造系と水槽を使用し、図7に示すような波返し板を置くことで、波頭を抑え波の打ち上げを抑制して付加減衰量の変化を調べ、有効な付加減衰量が得られる範囲を調べた。その結果が図8である。振動振幅によっても付加減衰量に対する波返し板の位置の影響が異なるが、大まかに言って水深の3倍程度の空間に波返し板が無い場合には板がまったく無い場合と同程度の付加減衰量が期待できる。観察によれば、この違いは波返し板に波頭が当たり始める水深とよく対応している。したがって、この例については水槽を

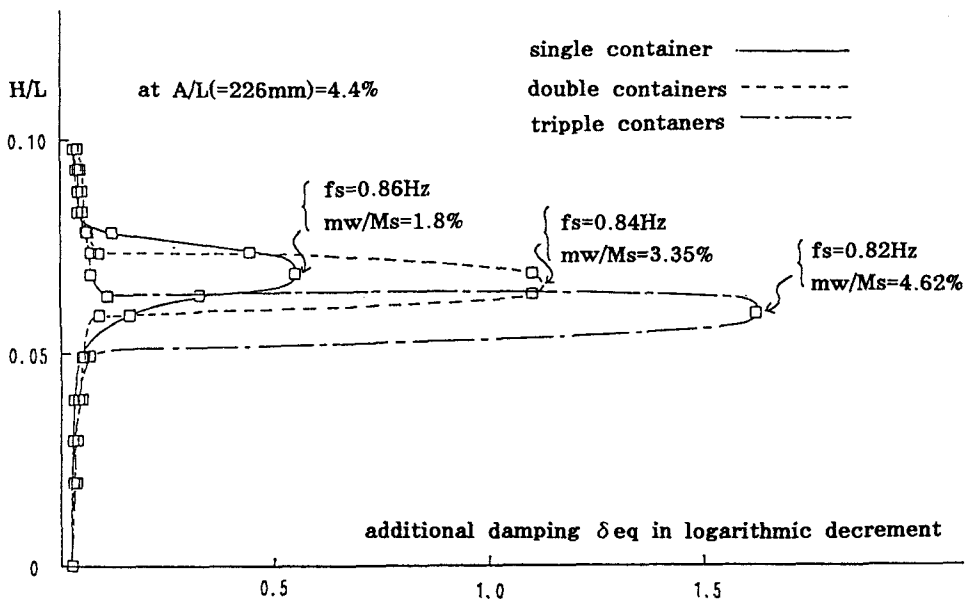
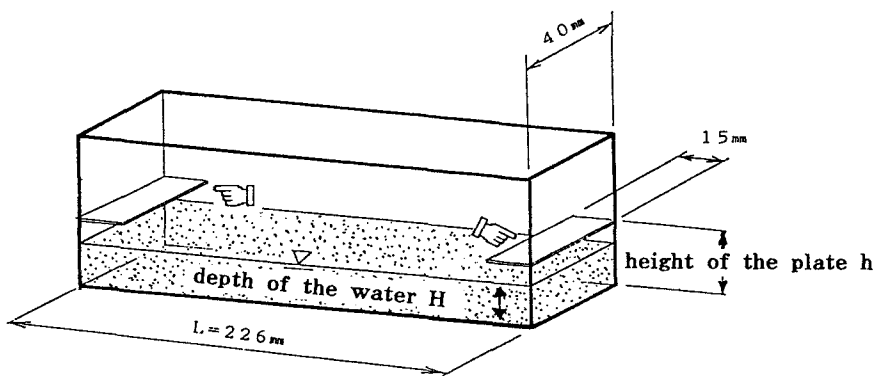


Figure 6 Effect of multiple sloshing dampers(Model B)

密封し天井をつける場合等、水槽の天井高さの寸法は水深の3倍を目安としてそれ以下ではスロッシングによる付加減衰量の低下が顕著に現われ、それ以上確保できればその低下はほとんど無いといえよう。他の例の観察結果をも検討すると、主構造系の振動振幅によっては共振時で波は水深の3倍あるいはそれ越える程度まで達する例もあり、水槽ダンパーが機能することが期待される主構造系の振動振幅に応じ、水槽の深さは検討される必要がある。



ceiling plate to restrict height of breaking wave

Figure 7 Configuration of a container with ceiling plates

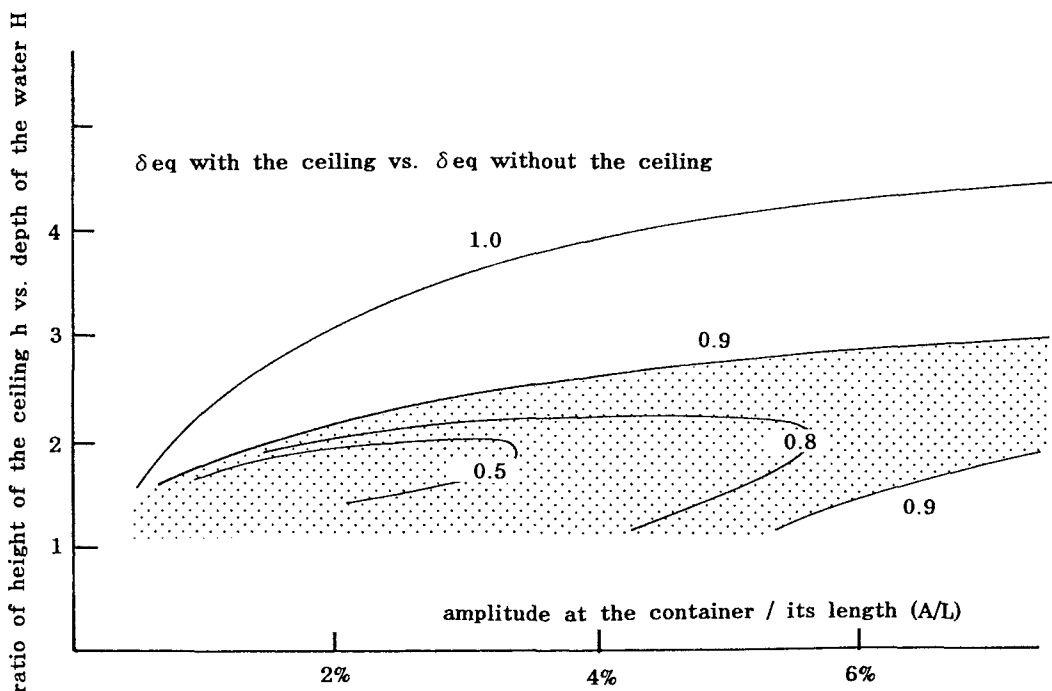


Figure 8 Diagram of reduction of additional damping due to ceiling plates

3. 結論

水槽ダンパーはTMDと並び、有効でかつ固定点を構造物外に求めなくともすむ減衰装置として期待されている。本論文では、水槽ダンパーの減衰器として適用上必要とされるであろう、簡略付加減衰性能推定近似式を提案し、水槽を分割した場合の効果、有効な付加減衰量を確保するための水槽の高さについて水槽の形状が長方形の場合に対し検討を実施した。その結果得られた主な結論は次の通りである。

- 1) 定常振動下のスロッシング振動を仮定し付加減衰効果を第1次近似として表現することとすると、簡略な付加減衰推定式を導くことができる。このとき、適当な減衰比をスロッシング運動に設定することにより、妥当な付加減衰量の推定を行なうことができることを長方形容器の水槽ダンパーについて示すことができた。
- 2) 水槽の配置上分割することが必要な場合には水槽の幅を単純に必要な数に分割すればよい。極端に分割数を増さず、壁面摩擦等の影響が現れない範囲では、分割による影響はほとんどなく、水槽ダンパーの付加減衰の支配的な要因はスロッシングによる砕波のエネルギー散逸としてとらえることができると考えられる。
- 3) 水槽の高さは水槽内のスロッシング振動に影響が無い程度に高いことが必要である。波の打ち上げ高さを抑制することは好ましくない。実験を実施した例では、波の壁面打ち上げ高さを水深の3倍以下を目安として制限した場合には得られる付加減衰量は著しく低下した。この限界の高さは、水槽ダンパー性能を代表する振動振幅により変化すると考えられ、それに応じ水槽の深さを検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は本州四国連絡橋公団からの援助を受け実施した。ここに、深謝の意を表わす。

参考文献

- 1) Modi, V.J. and Welt, F.: Vibration control using nutation dampers, Proc. Int. Conf. Flow Induced Vibration(England), pp.369-376, 1987.
- 2) 野路利幸他、スロッシングの原理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回年次学術講演会概要集、I-311,312,313, pp.674-679, 1988.
- 3) 藤野陽三他、同調液体ダンパーに関する非線形波動シミュレーションとその応用ー長方形容器の場合ー、第10回風工学シンポジウム論文集、1988.
- 4) Sato, T.: Tuned sloshing damper, 日本風工学会誌、No.32, 1987.
- 5) 宮田利雄他、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.34A, pp617-626, 1988.
- 6) 土木学会、土木技術者のための振動便覧(第2版)、土木学会、pp.414-416, 1985.
- 7) 佐岡暖也他、Tuned Liquid Damper(液柱管ダンパー)の制振効果について、土木学会第43回年次学術講演会概要集第1部、pp.30-31, 1988.

(1988年10月12日受付)