

凹字型水槽制振装置の開発研究（その1）

——周期調整機構を組み込んだ制振装置の動特性の研究——

寺村 彰
松岡 利隆
(本社 設計本部設計
第12部)

藤原 章博
秋山 猛
(本社 設計本部設計
第12部)

Development of a Vibration Control System Using a U-shaped Water Tank (Part 1)

——Investigation on Dynamic Characteristics of a Vibration Control System
with a Mechanism for Frequency Control——

Akira Teramura Akihiro Fujiwara
Toshitaka Matsuoka Takeshi Akiyama

Abstract

This report is concerned with investigation of a liquid-based bi-directional vibration control system which suppresses natural vibration of a high-rise building. The vibration control device is composed of a U-shaped water tank, air chambers, and mechanical springs which control variations of air pressure. Through experiments of prototypes, a shape of a tank shown to be efficient for vibration control was disclosed and it was proved that the mechanism of the air and springs has the function of changing natural periods of the system along two directions independently. Experiments with the device on a steel-framed model were also carried out and effectiveness of the system was shown as a result.

概要

本報告は、長周期構造物の基本振動を抑制するための流体式二方向制振装置の開発に関する研究について述べたものである。制振装置は①凹型水槽、②水槽上部の空気室と、③空気室の圧力変動を制御するための機械式ばね機構により構成される。本報告では複数の凹型小型水槽を用いて振動実験を行ない、制振に有効な水槽形状を検索すると共に、空気室と機械式ばね機構が流水の固有振動数を水平二方向に独立に変化させる機能を有すること、また、S造モデルに設置して動的実験を行ないその制振効果を検証したことなどを示し、この水槽制振装置の有効性を明らかにした。

1. はじめに

構造物が高層化し長周期化するのにもなって、風や地震に対する構造物の減衰不足による振動問題が顕在化しつつある今日、制振対策として構造減衰付与法、剛性調整法、制御外力付与法などそれぞれ駆動装置付きアクティブ型やパッシブ型の方法で制振装置の開発が進められている。

本研究は凹型断面の水槽を用いて水の流水運動を構造物の振動抑制に役立てるパッシブタイプの Tuned Mass Damper (T. M. D.) 制振装置の開発報告である。水は小さな加速度外乱入力にも安定した応答特性を示し、長周期性も得やすく、また、建築物に多量に蓄えられる水、例えば、防災計画上の主水槽などと兼用できる可能性がある。本研究では水槽内の流水揺動周期を人為的に調整して一方向ばかりでなく二方向の制振装置として機能させることを目標にして、水平二方向に凹型断面の水槽形状を採用して流水の周期制御の方法を検討したものである。

本報告では制振効率の良い凹型断面の形状の調査、後

述する周期調整機構を組み込んだ制振水槽試験体の各要素と装置全体の特性に関する実験と解析、高さ1mのS造4層モデルに設置して実施した制振効果の検証実験などの結果を述べ、この制振水槽が長周期構造物に対して有効な1つの制振装置になりうることを示す。

2. 制振水槽の基本構造

凹型水槽の基本構造は次のとおりである。図-1の(イ)空気開放モデルは立上がり部の空気が外気に開放された場合であり、固有周期は水質量と揺動時に生じる立上がり部の水位差に因る重力復元力で決まる。このモデルは空気室を連通した(イ')モデルに置き換えても振動特性は同じである。一方、(ロ)空気密閉モデルは立上がり部の空気が密閉された場合であり、流水変位に伴い一方の空気が加圧されると他方が減圧されて、空気室の体積変化に伴う空気ばね効果が重力復元力に加算されて固有周期が非常に短周期になるタイプである。このモデルは空気室の連通部に密閉の栓を設けた(ロ')モデルに置き換えても振動特性は同じである。

(ハ)モデルは(ロ')モデルの栓にばねを取付けて栓

をスライド式にすることによって空気密閉モデルと空気開放モデルとの中間周期を得る方法を提案している。しかしながら、この方法はわずかな空気漏れがオリフィス減衰となり周期を変える効果が無く、また、わずかな摩擦抵抗が復元力特性を非線形にしてしまい目標とする安定した振動数可変性が達成できない。これは“空気の気密性の確保”と“仕切り板の摩擦抵抗の低減”との条件を同時に満たすのが困難なためである。(二)モデルは水を介してロータリ弁を設けることにより、弁の周囲に多少の隙間があってもこれらの問題点を同時に解消することが可能であり、本報告で提案する方法である。弁を支持するロータリ軸には機械式ばねを取付けて流水の固有振動数を制御することができ、また、ダンパー機構などの制御に必要な装備を集中的に配備することもできる。

3. 凹型容器の流水特性に関する基礎実験

3.1 基礎実験の概要

本節ではまず基礎的調査として、上部が解放された凹型容器の形状が流水特性に及ぼす影響について調べた。凹型容器は立上がり部と水平部とで構成されるので構造物の水平成分の制振に寄与する水平部の水重量に相当する断面を大きく設計することができる。しかし、両部の断面比率が流水周期や減衰定数、制振力である流水慣性力などの動的特性に大きく影響を及ぼす。この影響を調べるためにまず基礎研究として空気解放モデルに相当する8種類の矩形容器と、比較対象として在来型の等断面U字管を試作して、動的特性の相違、及び、少ない水量で効果的な制振力を得るための水槽の形状を検索するための振動実験を行なった。

8種類の矩形容器は、図-2に示すように、幅400mm、と奥行100mmを共通として、水平部の深さaと立ち上がり部の幅bとの比a/bを0.3~3.0の範囲で変化させた。注水量は、図-2の試験体No. 10-10に例示するように、水の中心線長さLを各試験体とも共通にL=700mmになるように設定している。等断面U字管は直径Φ100mmの均一断面管を使用し水の中心線長さLが700mmである。

実験は、図-3に示す様に、鉄板で支持された架台に水容器を設置して、小型振動台で変位一定の正弦波加振を行ない、鉄板に張付けた歪みゲージの計測から共振曲線を得る方法で行なった。各試験体の重量等の諸元を表-1に示す。

3.2 流水の固有振動数特性

加振変位1mmの共振検索実験で得られた鉄板の歪共振曲線を図-4に示す。同図には水重量11.6kgfの重り代表する重錘荷重実験の共振曲線も示すが、この場合の固有振動数が約11Hzであり歪量が加振振動数の2乗に比例して増加するのみである。従って、同図に現れる各共振点は各容器の流水の固有振動数を表わし、その歪量は変位一定加振であるために振動数が高いもの程大きくなっている。

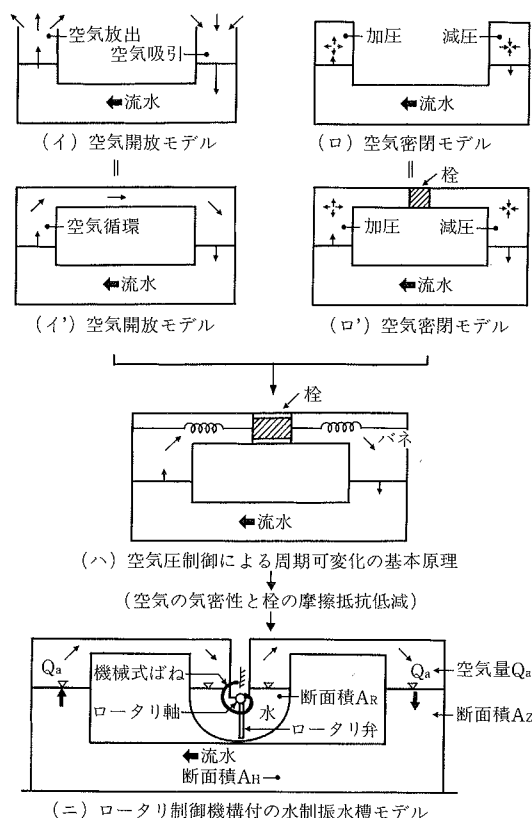


図-1 流水運動を制御するロータリ機構付制振水槽の基本構造

表-1 各試験体の諸元

試験体の名称No.	断面積cm ²		長さmm		重量kgf		
	A _H	A _Z	L _H	L _Z	水	容器	架台
No.05-05	75	56	34	14	4.58	6.60	5.27
No.05-10	49	100	30	18	5.68	6.64	5.27
No.05-15	50	150	25	20	7.74	6.58	5.27
No.10-05	120	54	35	12	6.17	6.62	5.27
No.10-10	100	100	30	15	7.80	6.53	5.27
No.10-20	100	196	20	20	11.57	6.18	5.27
No.16-05	171	57	34	9	8.00	6.51	5.27
No.15-10	148	101	30	13	8.60	6.37	5.27
No. U20	内径Φ100mm L=700mm				5.70	5.37	5.27

U字管試験体 No. U-20の固有振動数の測定値は約0.8 Hzであり、初期に定めた水の中心線長さL=70cmを用いて運動方程式(1)で求められる計算値に対応する。

$$\rho \cdot A \cdot L \cdot \ddot{X}_z + 2\rho \cdot g \cdot A \cdot X_z = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ρ :水単位質量、 A :管断面積、 X_z :流水変位、 g :重力加速度である。矩形断面の場合には各試験体共中心線長さL=70cmが共通であるにもかかわらず固有振動数が、図-4に示す通り、0.7~1.3 Hzの範囲で異なることが分かる。矩形試験体は、図-5に示すように、2種の断面積 A_z, A_H を持つ。流水の運動方程式は位置エネルギーと運動エネルギーの関係から導かれる固有振動数方程式から運動方程式に直して変位 X_z に関して式(2)になる。

$$\rho A_z \{2L_z + L_H(A_z/A_H)\} \ddot{X}_z + 2\rho g A_z X_z = 0 \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 A_z, L_z :立ち上り部の断面積と長さ、 A_H, L_H :

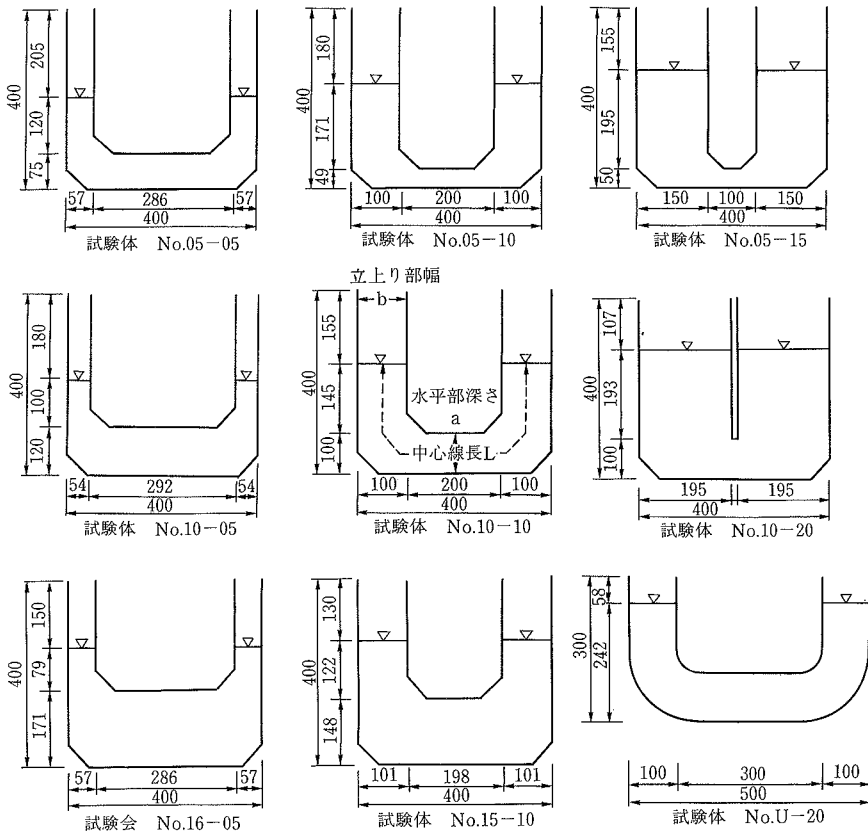


図-2 矩形容器 (奥行き 100 mm) と U 字管 (Φ100 mm) の試験体形状

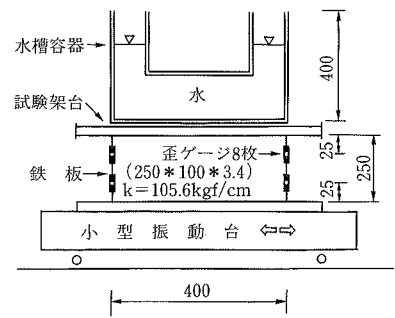


図-3 実験方法

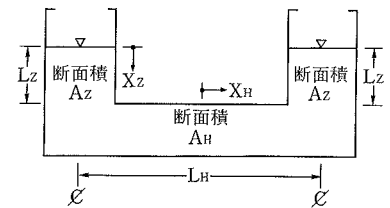


図-5 矩形容器の水寸法概念

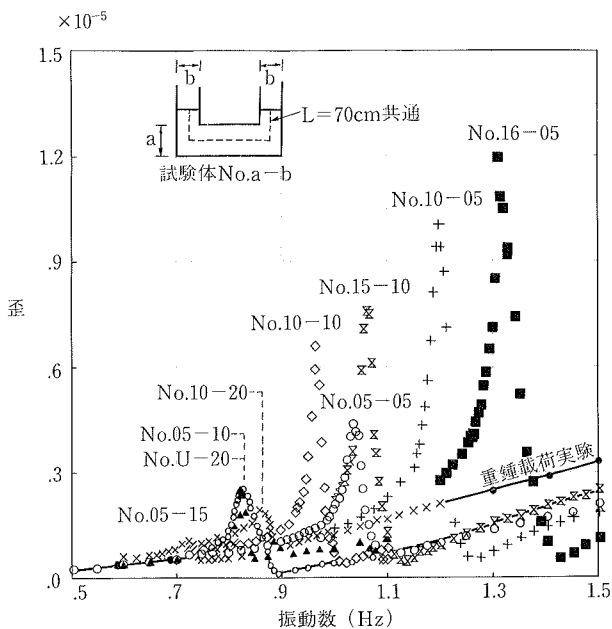


図-4 矩形容器, U 字形容器と重錘 11 kg 載荷実験の共振曲線測定値

水平部の断面積と水平距離である。凹断面の水有効長さ L_w は式(3)から $L_w = 2L_z + (A_z/A_H)L_H$ で表されるので L_H と L_z の取り方について検討した結果, 図-5 に示すように, 立上がり部の長さ L_z を水平部の上面から水面まで, 水平部の長さ L_H を立上がり部中心間距離とする

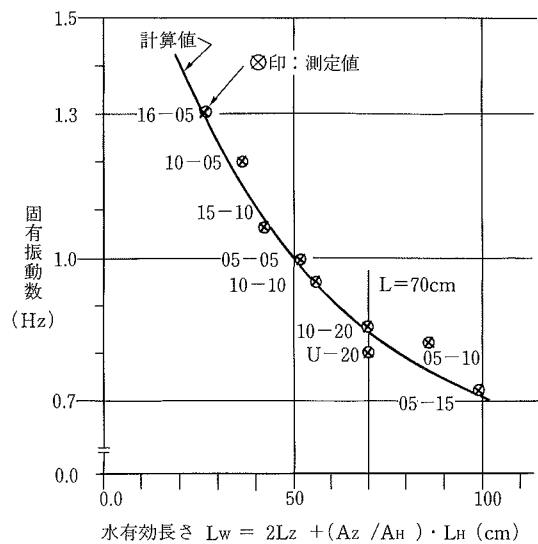


図-6 矩形容器と U 字形容器の固有振動数の測定値と計算値

ことよって固有振動数の計算値は, 図-6 に示す通り測定値に対応することがわかった。

3.3 流水の減衰特性

共振曲線から $\sqrt{2}$ 法で得た減衰定数は, 図-7 に示すように 2%~10% の範囲に広がっている。断面積 A_H , A_z の差が大きいと流水運動が不活発になり共振倍率が低下して減衰定数が大きくなる傾向にある。T. M. D. 制振理論

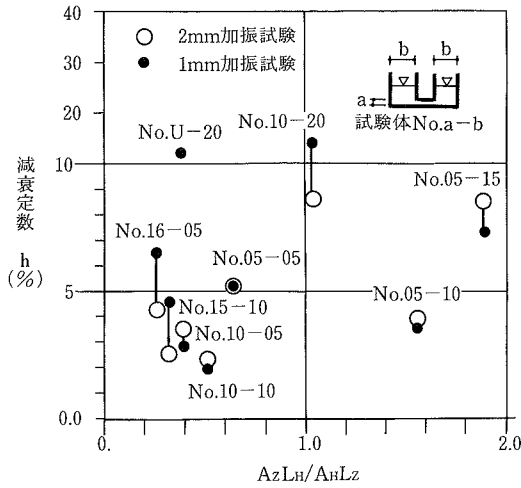


図-7 矩形試験体の減水定数の測定値

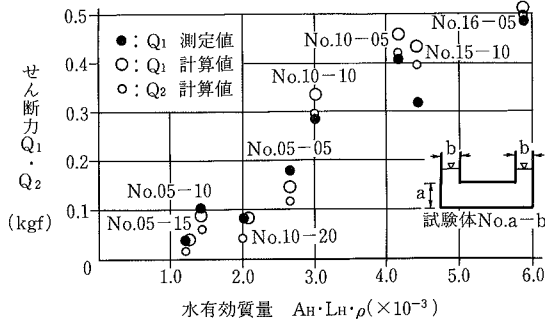


図-8 各試験体のせん断力の測定値と計算値

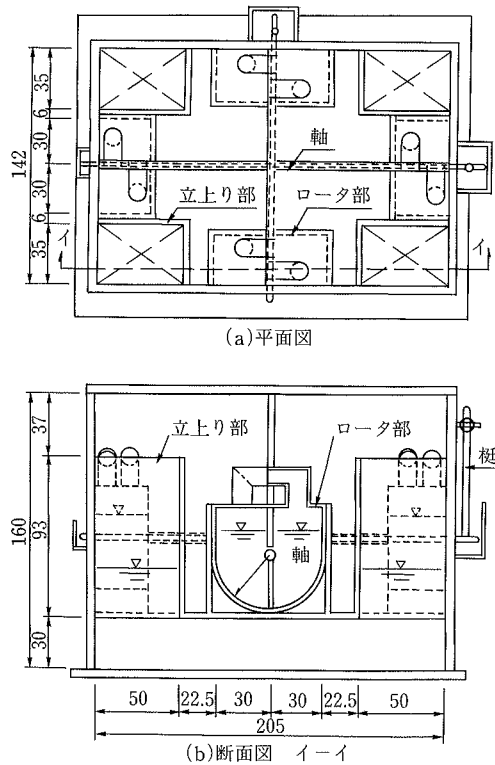


図-9 二方向用制振水槽試験体の形状

表-2 試験体の諸元

試験体	水 容 器				空 気 室	ロータリ部分					
	AH	LH	Az	Lz	Qa	kco	mr·g	hc	hw	a·b	r
	cm ²	cm	cm ²	cm	cm ³	gf/cm	g	cm	cm	cm ²	cm
一方向試験体	41.7	17.9	41.7	1.4	解放: 1430 密閉: 1231 (1個)	8.75	0.25	5.7 4.9 3.7	0.6	45.9 (1個)	2.8
二方向試験体	42.6	15.4	17.5 (1個)	3.0	解放: 624 密閉: 582 (1個)	3.10 (1個)	0.06 (1個)	5.9 4.3 3.2	1.0	10.9 (1個)	2.9

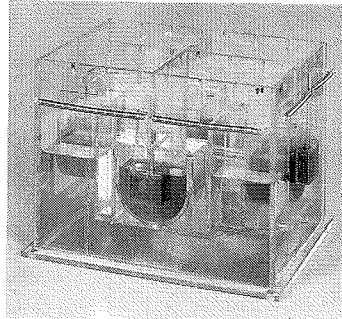


写真-1 二方向用制振模型試験体

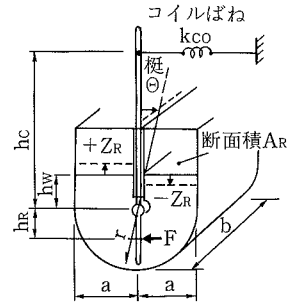


図-10 ロータリ部の軸、榑とコイルばねの概要図

では最適減衰値に見合う減衰装置を設ける必要があるが、今回の実験に限れば底部断面積 A_H と立上り部断面積 A_z との断面比率が $A_H/A_z=0.5\sim 2.0$ の場合に制振システムとして適当な3~5%程度の減衰定数が得られる傾向にある。

3.4 流水の慣性力特性

各試験体の共振点で、鉄板の歪量から検出したせん断力 Q_1 を図-8 に●印で示す。○印の計算値は水平方向に寄与する質量 $\rho A_H L_H$ と、表-1 に示す架台、容器及び水平方向の慣性力に寄与しない残余水の質量からなる2質点系モデルの運動方程式を用いて求めた鉄板に作用するせん断力 Q_1 及び流水慣性力 Q_2 である。さらに、せん断力 Q_1 から重錘载荷試験によるせん断力 Q を差し引いたせん断力値 Q_1' を水平部の水重量で割った単位水量当たりのせん断力について検討すると、流水の慣性力は試験体 No. 10-05, No. 10-10, No. 15-10, No. 16-05, No. 05-05の順に小さくなり、つまり水平部の断面積 A_H が相対的に大きくなって流水慣性力に対して不利にならない傾向が確かめられた。

4. 振動数調整機構をもつ凹型水槽の動的特性実験

4.1 実験概要

振動数調整機構をもつ凹型水槽の模型試験体を写真-1, 図-9 に示す。容器は4隅に立上がり部を持ち、中央部で仕切られた4つの空気室を持つ。周期調整用のロータリ部は水平二方向用に二対、計4個が相接する空気室を互いにつなぐかたちで設けられている。ロータリ弁を支える軸は互いに面するもの同士連結されており振動時に同相を保つ。また、ロータリ軸は先端が容器の外に張り出してその先端に榑を介して機械式ばねで拘束されている。表-2 に試験体の諸元を示すが、同表に示す一

表-3 固有振動数の測定値と計算値

(単位: Hz)

	ロータリ単独		空気開放状態		密閉状態		全体系	
	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値
一方向試験体	5.5 4.7 4.2	4.9 4.5 3.9	1.5	1.5	10.0	10.1	3.1 2.6 2.3	3.7 2.5 2.3
二方向試験体	5.0 4.6 4.2	5.4 4.7 3.9	1.4	1.6	9.5	10.0	2.8 2.6 2.3	2.9 2.6 2.3

方向用試験体は同様の検討を行なうために製作したものであり、容器の両側に一对の立ち上がり部、空気室とロータリ部を設けている。両試験体の外形寸法はほぼ同じで表-2に示すように空気体積 \$Q_a\$ とロータリ部の容積 (\$a \cdot b\$) などが異なる。両試験体の固有振動数は後述する約 2.6 Hz の S 造モデルに適用するためにほぼ同振動数になるように設計している。本節では制振水槽を構成する要素の特性と、全体系の特性を共振検索試験で調べた結果について述べる。なお、実験結果の図は二方向用試験体の長手成分で代表させた。

4.1.1 ロータリ部の特性 ロータリ部の概要を図-10に、諸元を表-2に示す。コイルばねは一方向用試験体に線径 4 mm、二方向用に線径 3 mm のものを使用した。ロータリ部の単独の固有振動数は艇の回転角の共振試験より求めた結果、ロータリ軸からコイルばね取り付け位置までの距離 \$h_c\$ に応じて若干変わり表-3に示すとおり 4~5 Hz にある。固有振動数の計算値はロータリ弁に作用する力 \$F\$ と水位差 \$Z_R\$ の復元力式(3)と内部水質量 \$m_R\$ を考慮して求めた結果、表-3に示す通り、ほぼ測定値に対応した。ここで、\$a, h_c, h_R\$ 等々の各記号を図-10に示す。

$$F = \{(2a \cdot h_c^2) / (h_R \cdot r^2) \cdot k_{co} + 2\rho g a b\} Z_R \quad \dots\dots\dots(3)$$

4.1.2 空気開放モデルの特性 水槽上部の蓋を取除くと凹型水槽は空気開放状態になる。この共振点は、水槽内の側面に取付けた水圧計で計測した共振曲線図-11(空気解放)から 1.4 Hz である。計算値は運動方程式(2)から求めて表-3に示すように測定値にほぼ対応する。

4.1.3 空気密閉モデルの特性 空気密閉状態は上部蓋を取付けて、かつ、ロータリ部への空気出入口を遮断する方法で再現した。共振曲線を図-11(空気密閉)に、共振振動数をまとめて表-3に示す。

密閉状態の復元力特性は水位差 \$X_z\$ による重力復元力と空気室の圧縮・減圧による空気ばね復元力の和である。空気ばね復元力を導くに当たり、空気室圧力 \$p_0\$ 一定のもとで一定の空気容積 \$Q_a\$ が体積変化 \$\Delta Q_a\$ を受けるものとする \$pQ^n = p_0 Q_a^n = \text{一定}\$ (\$n\$: 比熱比) の関係、また、この体積変化 \$\Delta Q_a\$ が非常に小さく、かつ、緩慢でほぼ等温的であるものとする。空気ばね復元力 \$P_a\$ は、水位変動による空気室の体積変化 \$\Delta Q_a = \pm A_z \cdot X_z\$ に起因する室左右の圧力差 \$\Delta p = n p_0 \cdot \Delta Q_a / Q_a\$ に断面積 \$A_z\$ をかけた式(4)で表される。

$$P_a = (n p_0 A_z^2 / Q_a) X_z \quad \dots\dots\dots(4)$$

故に、密閉状態の運動方程式は 2 つの空気室に対して式(5)が導かれる。固有振動数の計算値は \$p_0 = 1.034 \text{ kgf/cm}^2\$、

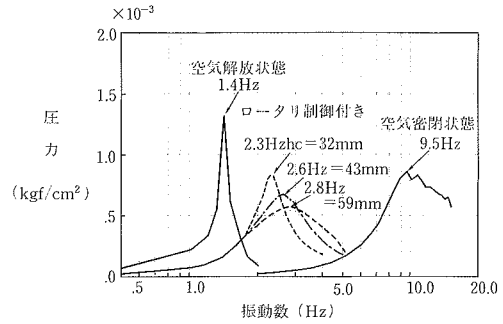


図-11 制振水槽の各要素と全体系の共振特性の測定結果

\$n=1.2\$ として表-3に示すように一方向用 10.1 Hz、二方向用 10.0 Hz であり測定値にほぼ対応する。

$$\rho A_z \{2L_z + (A_z/A_H)L_H\} \ddot{X}_z + 2\{\rho g A_z + (n p_0/Q_a)A_z^2\} X_z = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

4.1.4 ロータリ制御機構を含む全体系の特性 上記の要素特性で構成される二方向用制振水槽全体系の空気圧変動の共振曲線を図-11(ロータリ制御)に示す。流水の復元力特性は立ち上がり部の水位差 \$X_z\$ による重力復元力と、機械式ばねで空気体積変化 \$\Delta Q_a\$ 式(6)を制御する方法で空気室の圧力が制御される機構の空気ばね復元力 \$P_a\$ 式(7)から求められる。

$$\Delta Q_a = A_z \cdot X_z - A_R \cdot X_R \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$P_a = \Delta p \cdot A_R = (n p_0/Q_a) \cdot (A_z \cdot X_z - A_R \cdot X_R) A_R \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、\$X_z\$ は立ち上がり部の水位差、\$X_R\$ はロータリ部の水位差である。また、\$P_a\$ と機械式ばね \$k_c\$ の復元力 \$P_c\$ との力の釣り合い式(8)から変位 \$X_z\$ と \$X_R\$ の関係式(9)が得られる。

$$P_a = P_c = k_c \cdot X_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\{k_c + (n p_0/Q_a)A_R^2\} X_R = (n p_0/Q_a) A_z \cdot A_R \cdot X_z \quad \dots\dots\dots(9)$$

全体系の復元力特性 \$P\$ は、式(9)の \$X_R\$ を式(7)に代入して重力復元力項も含めて式(10)として導かれる。

$$P = 2\left\{\rho g A_z + \frac{k_c \cdot (n p_0/Q_a) A_z^2}{k_c + (n p_0/Q_a) A_R^2}\right\} X_z \quad \dots\dots\dots(10)$$

従って、流水の運動方程式は式(11)で表される。

$$m \cdot \ddot{X}_z + c \cdot \dot{X}_z + k X_z = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、

$$m = \rho \cdot A_z \{2L_z + (A_z/A_H)L_H\}$$

$$k = 2[\rho g A_z + \{k_c \cdot (n p_0/Q_a)A_z^2\} / \{k_c + (n p_0/Q_a)A_R^2\}]$$

$$k_c = (2a \cdot h_c^2) / (h_R \cdot r^2) \cdot k_{co} + 2\rho g a b$$

固有振動数の計算は厳密にはロータリ部の水質量と重力ばねが介在した 2 質点系の解法によるが、ここでは連成効果を見捨て式(11)により求める。一方向試験体の場合には式(11)より、二方向試験体の場合には各要素数を配慮して、表-2に示す諸定数から求められる固有振動数の計算値を表-3に測定値と比較して示す。

また、二方向試験体の短辺方向の固有振動数の測定値

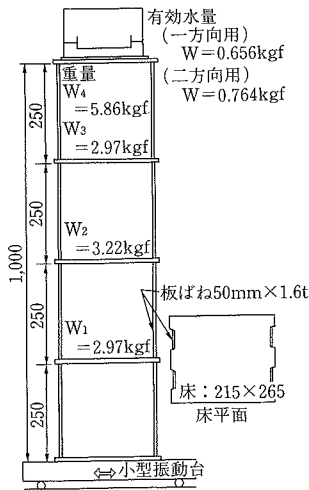


図-12 S造4層構造モデルの概要

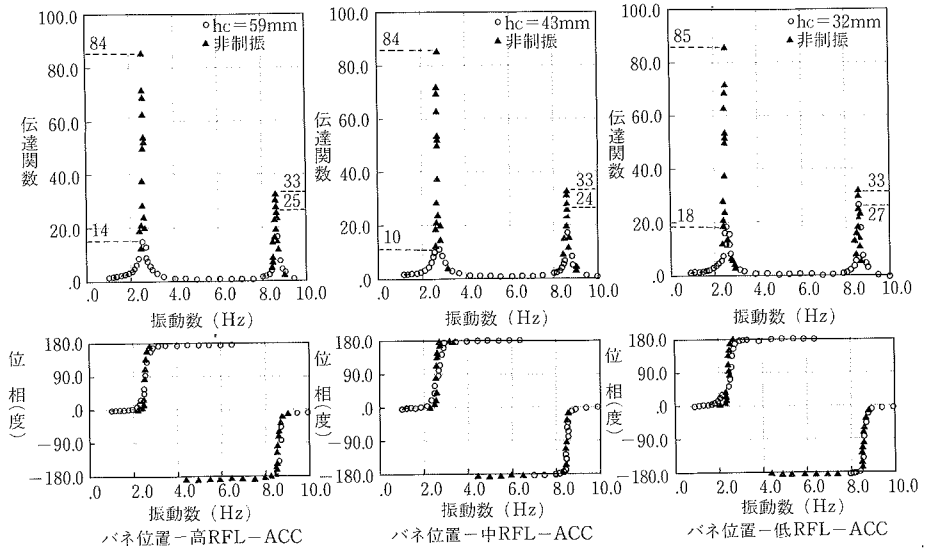


図-13 S造4層構造モデルの非制限・二方向制振水槽付のR階の共振特性

は4.0 Hzである。さらに、二方向試験体を45度方向に加振した時の共振曲線では、 $h_c = 59 \text{ mm}$ で長辺方向2.8 Hzと短辺方向4.0 Hzの固有振動数が独立して現れることを把握した。これらの二方向性の特性に関する詳細については次の機会に報告する予定であるが、1つの水槽で流水の固有振動数を水平二方向に独立に変える効果をもつと言える。なお、振動数の調整法には藤田¹⁾らが実用しているように空気圧 p_0 を変えて行なう方法もあり、これらを併用することによりさらに細かい微調整と広い振動数範囲で対応が可能になる。

5. 制振効果の確認実験

制振効果に関する検証実験は、図-12に示すように水槽試験体を固有振動数2.6 HzのS造4層構造モデルの頂部に設置した場合と、等重量の重錘を載荷した場合について、正弦波加振に対する屋上階の加速度伝達関数を測定する方法で行ない、図-13に示す結果を得た。図-13には二方向用試験体の h_c に関する3ケースの伝達増幅率曲線を示しており、 h_c は図-10に示したとおり、機械式ばねの取付け距離でありそれぞれ流水振動数を微調整することに相当する。この結果、入力加速度に対する伝達増幅率は非制振の84倍に対して中央の図に示す $h_c = 4.3 \text{ cm}$ の場合が構造モデルの1次振動に最も同調して10倍に低減した。また、一方向用の場合には同、99倍から $h_c = 4.9 \text{ cm}$ の場合に9倍に低減した。この実験では減衰ダンパーを取付けていない。TMD理論では質量比約4%に対して最適理論減衰定数²⁾は $h = \text{約}11\%$ であるが、本装置の減衰定数は、図-11から、 h_c の小さい場合に約10%、大きい場合に約30%程度である。実機対応で容器形状が大きくなると流水の減衰定数が減少する傾向にあるので、その場合に理論減衰に相当するダンパーを備えることになる。

6. まとめ

凹型断面容器、空気室とロータリ周期調整機構から構成される制振水槽モデルを製作して基本的な特性を知るために実験および解析を行なった。この結果をまとめると以下の通りである。

- ① 空気室解放モデルの複数の凹型断面容器で形状が流水特性に及ぼす影響を調べた結果、立上がり部と水平部の断面積比率を1:2以内程度とすることが望ましい。
- ② 凹型断面容器、空気室とロータリ周期調整機構から構成される制振水槽モデルの構成各要素及び全体装置の加振実験より得られた動特性を解析的に把握できることが分かった。また、1つの容器で二方向に独立した固有振動数が得られ、この詳細は次の機会に報告する予定である。
- ③ S造4層モデルに設置して振動台正弦波入力に対する伝達特性を調べた結果、構造モデルの特性に合わせた制振効果が得られることが確認された。

謝辞

本研究は当社「制振技術・研究開発グループ」の研究開発の一環として行なったものである。また、三菱重工業(株)船舶海洋技術統括室、日比氏、同長崎研究所、藤田氏、香川氏から技術支援を受けた。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤田, 香川, 日比, 綾部: 流体式制振装置による中高層建物の耐風制振, 日本建築学会大会(東北) 学術講演梗概集, p. 997~998, (1991.9)
- 2) 武田寿一編: 建造物の免震・防振・制振, 技報堂出版, p. 172, (1988.5)