

# 流体式制振装置(MOVICS)を付与した高層建物の動特性

寺村 彰 川口 彰久 吉田 治  
岡田 宏 安井 譲

## Dynamic Characteristics of High Rise Building with Liquid Vibration Control System

Akira Teramura Akihisa Kawaguchi Osamu Yoshida  
Hiroshi Okada Yuzuru Yasui

### Abstract

A liquid type vibration control system installed on tops of buildings was developed for use to provide reductions in the movements of steel frame high rise buildings loaded by wind or earthquake. The system is a type of tank with a bi-directional period adjustment device for tuning with the x and y bi-directional natural modes of vibration of the building, respectively. The system was applied to three steel frame buildings and experimental and analytical studies on dynamic interactions between system and building were made to examine the effectiveness of the system. It was found that good results had been attained.

### 概要

流体式制振装置は強風、地震で揺れやすい鉄骨造高層建築などの長周期構造物を対象として、簡便な装置で振動抑制をはかり快適な居住環境を実現すべく開発したものである。この装置は建物の上部に底面が正方形の水槽を設置して、駆動装置を使わずに、水槽内の水の固有振動により自然に生じる流体慣性力を利用して建物の短辺および長辺方向の固有振動を同時に抑制する新しい制振装置である。1993年6月から翌年6月にかけて3つの建物に適用し、技術データを収集すると共に工事完了直前に振動実験を行い、制振建物としての動特性評価により制振性能を検証した。この結果、当初の目標性能が達成でき制振建物が実現されたことを確認した。

## 1. はじめに

都市の高密度化に伴って、建物は高層化しさらに超々高層建築の計画が建設各社等で発表され研究が継続されている今日、従来からの耐風性や耐震性技術と共に、台風や地震時の居住環境を保つための振動抑制対策が課題となっている。

この問題を解決する方法として、鉄骨構造の振動エネルギー吸収不足を補うために、ブレースダンパーや付加した重量体から反力を得る Tuned Mass Damper (以下、TMD)、駆動装置を使うアクティブマスダンパー、ハイブリッド制振などがある。これらの制振システムが建築および機械分野各社で開発され実用段階に至っている。

こうしたなかで流体（水）を利用する TMD 制振方法がここ数年来、機構の簡便さや低トリガーレベルなど数多い特徴から注目されている。流体式制振装置には水槽内に生じるスロッシング現象を利用する Tuned Liquid Damper と、水槽の断面が U 字形をなし、いわゆる液柱管の水の往復運動を利用する Tuned Liquid Column Damper (以下、TLCD) とがあり、いずれも流体の固有振動により生じる慣性力を建物の反力に利用するものである。

本流体式制振装置(MOVICS)はこの TLCD の 1 つであり、駆動装置を使わずに、周期調整部を持つ水槽を建物上部に設置して、建物の短辺、長辺方向の動きに同時に同調させて振動抑制をはかる新しい制振装置である。今回、3つの建物に適用しそれぞれ建物の動特性に関する実験および解析を行ったので、本装置を適用した制振建物としての概要および諸動特性を報告するものである。

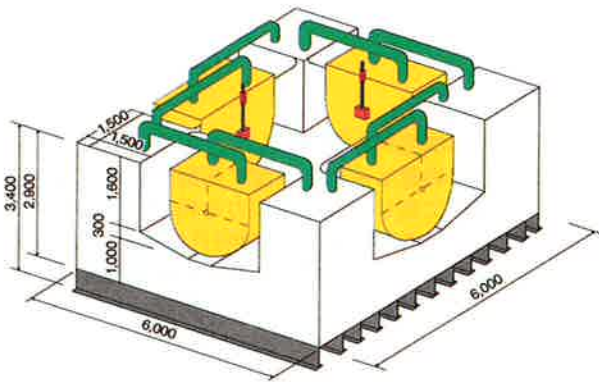
## 2. 建物および制振装置の概要

### 2.1 建物の概要

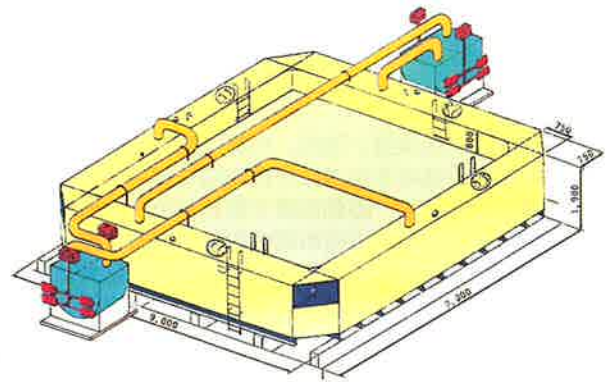
制振装置を設置した建物は、本所報の冒頭に写真で示した 3 建物(A, B, C とする)である。A, C 建物はそれぞれ高さ 106.2 m, 33.3 m で細長い塔状構造物であり、B 建物は高さ 112.4 m で風の影響を受けやすい臨海部に位置する建物である。いずれの建物も再現期間 1 年の強風に対して居住性評価指針<sup>1)</sup>の最低知覚を越える応答加速度が予想されたため、無感振動に抑制し、かつ、地震時の揺れをすみやかに止めることを目的にこの制振装置が設置されたものである。各建物の用途、地上部重量、設計周期等の諸元、および、制振装置の有効水量、建物の地上部重量に対する水量比などの諸元を表-1に示す。

表一 建物および制振装置の概要

		A建物	B建物	C建物
建物	用途	ホテル	ホテル	事務所・住宅
	階数	B3階, 地上26階, PH2階	B3階, 地上28階, PH3階	B2階, 地上8階, PH1階
	最高高さ	106.2 m	112.4 m	33.3 m
	基準階	17.5 m×8 m(高層部)	36.3 m×36.9 m(高層部)	6 m×12 m
	延べ面積	9,769 m <sup>2</sup>	77,491 m <sup>2</sup>	720 m <sup>2</sup>
	地上重量	4,635.3 tf	42,780.0 tf	940.0 tf
	構造	地下SRC造, 地上S造	地下SRC造, 地上S造	地下SRC造, 地上S造
設計周期	短辺	T1=2.23秒, T2=0.70秒	T1=2.97秒, T2=1.15秒	T1=1.03秒, T2=0.34秒
	長辺	T1=2.20秒, T2=0.68秒	T1=2.86秒, T2=1.11秒	T1=0.94秒, T2=0.32秒
制振装置	制振方向	建物の水平二方向	建物の水平二方向	建物の水平二方向
	タイプ	MOVICS-1型	MOVICS-2型	MOVICS-2型
	設置場所	PH階屋上	PH2階	R階
	装置形状	6.0 m×6.0 m×高さ 3.4 m	9.0 m×9.0 m×高さ 1.9 m	2.5 m×2.5 m×高さ 1.7 m
	有効水量	35.1 t (全水量 57.9 t)	81.7 t (全水量 103.7 t)	4.5 t (全水量 5.3 t)
	重量比	0.76% (有効水量/地上重量)	0.19% (同左)	0.48% (同左)
	ストローク	±720 mm	±400 mm	±250 mm



図一1 MOVICS-1型(A建物)



図一2 MOVICS-2型(B建物)

## 2.2 制振装置開発上のねらい

本装置は、周期1秒以上の長周期構造物を対象とし、建物上部に大型水槽を設置するタイプである。開発上のねらいは次の通りである。

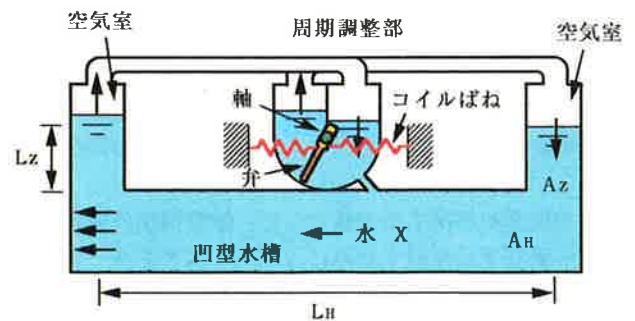
- ① 1つの大型水槽で建物の水平二方向の制振実現。
- ② 電力や駆動装置を使わない装置の低コスト化。
- ③ 水槽として維持管理の軽減。

その他、A建物においてはスプリンクラー水量とほぼ整合し水槽と兼用している。このように建物内の水の有効利用や兼用がはかれるものである。

## 2.3 制振装置の概要

この制振装置は水槽内の流体の固有周期を調整して、建物の固有周期と共振(同調)させて建物の振動エネルギーを流体の運動エネルギーに変換し、さらに、流体運動中に適切な減衰性(最適理論減衰)を持たせてこの運動エネルギーを消散するものである。

本装置はA建物に適用されたように水槽の4隅に立ち上がり部を持つMOVICS-1型(図一1)と、B、C建物のように水槽の各辺に立ち上がり部を持つMOVICS-2型(図一2)とがあるが、両型式による性能や設計上の相違は



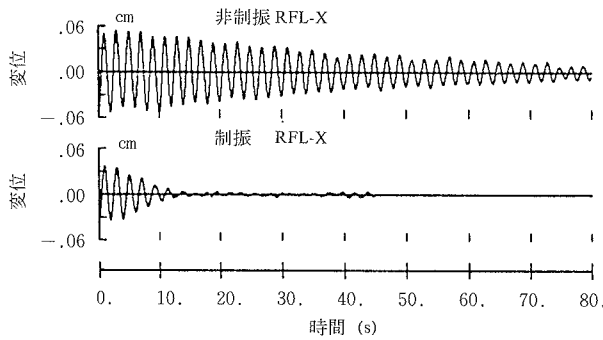
図一3 制振装置の断面構造

ほとんどなくいずれも水槽と周期調整部とで構成される。

水槽は建物の制振に必要な水量を蓄えるものであり、この基本的な断面形状は水平二方向に各々凹型(矩形U字形)である。この水の周期は、原形としてのU字管パイプの場合が水長 $l$ 、重力加速度 $g$ より、 $T=2\pi\sqrt{l/(2g)}$ で表されるように、凹型断面の場合も同様に、断面形状に応じた有効長さ $l'$ を計算<sup>2)</sup>して同式から求められる。しかし、水槽が実建物に装備され大型化すると、水の周期は建物周期と比べてはるかに長周期となる。

表一 非制振・制振建物の固有周期と減衰定数の測定値

建物/方向	非制振建物		制振建物	
	固有周期	減衰定数 (C/Cc)	固有周期	減衰定数 (C/Cc)
A 短辺	2.08秒	0.55%	2.08秒	5.50%
	2.00秒	0.68%	2.00秒	6.00%
B 短辺	1.96秒	0.80%	1.96秒	3.10%
	1.92秒	1.03%	1.92秒	3.40%
C 短辺	0.80秒	0.76%	0.80秒	3.64%
	0.62秒	0.98%	0.62秒	3.25%



図一四 A 建物の自由振動減衰波形

周期調整部は流体の固有周期を短周期化するための装置であり、図一三の断面図を参照して次のような原理に基づくものである。建物の揺れに伴って水槽の水が一方方向へ移動したとき、立ち上がり部の空気の方が加圧、他方が減圧され、この空気圧力差が空気連通管を介して周期調整部の水表面に作用し、この水の移動に引きずられて弁と弁を支持する軸が回転する。従って、この軸は水槽の水の動きと連動する構造であり、軸を外部に張り出し機械式ばねを取り付けると、このばねの強さに応じて水槽の水の周期は短周期化される仕組みである。

この周期調整部は水槽の二方向に各々ばね強さの異なるものが取り付けられて、水の運動周期は建物の短辺と長辺方向の固有周期に同調する<sup>2)</sup>。

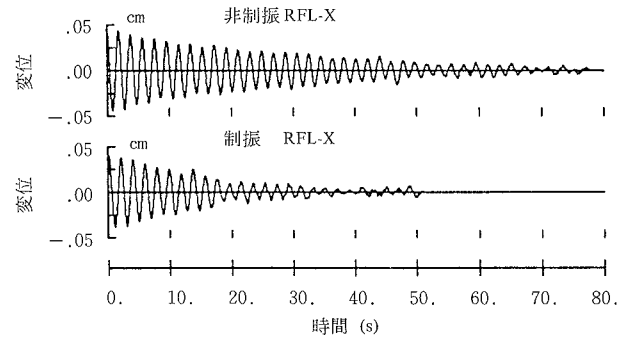
減衰性は後述するとおり水槽の形状と周期調整部の構造からほぼ実用上達成されるので本装置はいわゆるダンパー不要の利点を有しているものである。

この制振装置が適用される強風や地震動の強さは対象建物の周期が大きく変わらない範囲である。この範囲内で水の最大応答変位に合わせて水槽の立ち上がり部の高さ（ストローク）を設計する。これ以上の水変位が生じると立ち上がり部の上蓋へ水圧が作用することとなる。

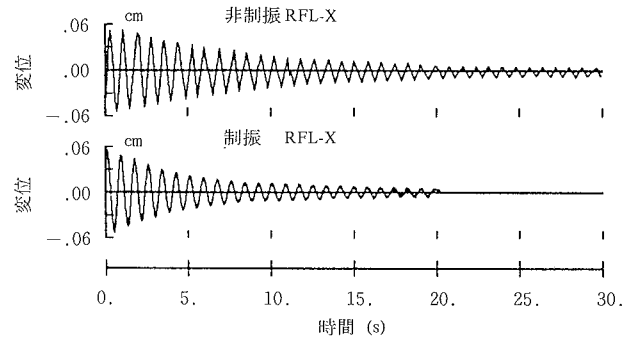
### 3. 実験

#### 3.1 実験方法

実験は注水前を非制振状態（以下、非制振建物）として、常時微動測定および各種加振実験で、非制振と制振



図一五 B 建物の自由振動減衰波形



図一六 C 建物の自由振動減衰波形

建物の固有周期、固有モード、減衰定数  $h\%$ （臨界減衰比  $C/C_c$ ）などの動的諸定数の調査を目的として実施した。

#### 3.2 実験結果

A～C 建物の短辺、長辺方向の 1 次固有周期は、常時微動の周波数分析から、表一に示す通り、A、B 建物が約 2 秒、C 建物が 0.6～0.8 秒であり、制振建物の場合も、水重量が建物重量の 1/100 未満で小さいため変わらない特性である。

減衰定数の測定は、屋上階で人力で建物周期に合わせて壁面を押し、振幅が十分に成長してからその後の自由振動減衰波形を分析する方法で行った。図一四に A 建物、図一五に B 建物、図一六に C 建物の短辺方向の記録波形を示す。なお、長辺方向も同一建物ではほとんど同じ波形であり省く。波形分析して得た減衰定数は表一に示すように非制振建物の  $h=0.5\sim 1.0\%$  が制振建物で  $h=3\sim 6\%$  に増加している。なお、A 建物は水槽がスプリンクラー水源を兼ねており、これに必要な水量が多かったために他の建物と比べて制振効果が良くなっている。これらのデータから制振建物では振幅が速やかに減少することが分かる。

制振効果に関して、A 建物の常時微動波形を図一七に、このフーリエ周波数分析結果を図一八に、また、図一九に大型起振機を B 建物の屋上に設置して加振実験を行った共振曲線とその解析結果を示す。いずれのデータからも目標とした制振建物の 1 次固有振動の最大振幅は小さく制振効果が認められ、2 次以降の高次振動に対する影響は無いと言える。

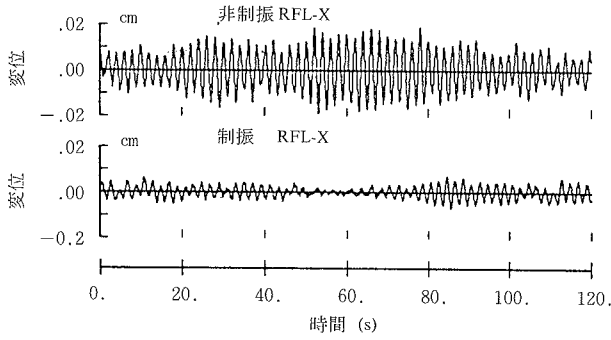


図-7 A 建物 R 階の常時微動波形

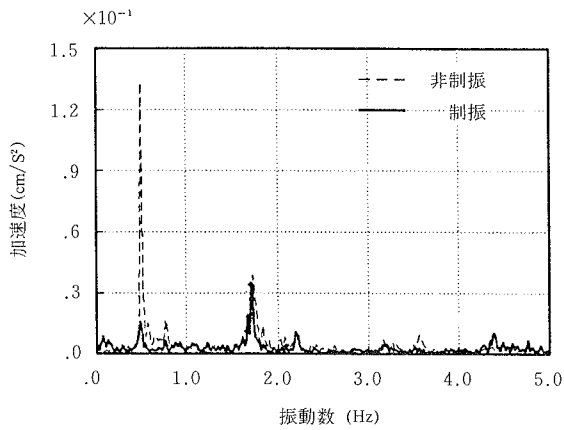


図-8 A 建物 R 階のフーリエ周波数分析結果

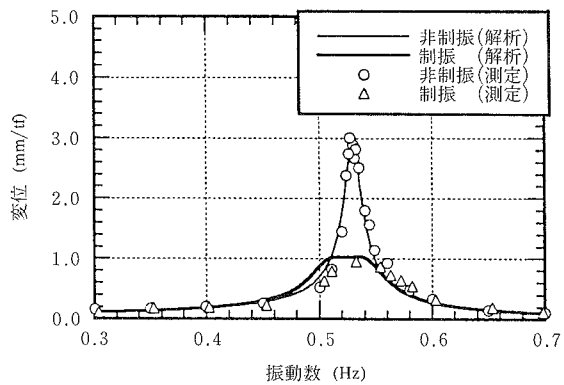


図-9 B 建物 R 階の共振試験結果

#### 4. 解析

##### 4.1 制振装置の設計フロー

制振装置の設計フローを図-10に示す。まず建物の重量と剛性分布から伝達関数を求め、制振目標値を満たすのに必要な水量を略算応答解析で決める。次に水槽の形状を設計し、風、地震外乱に対して連成系解析から制振建物の動特性および制振効果を確認する。

##### 4.2 制振装置の周期と減衰特性

水槽の流体周期は、二方向凹字形断面について各々一方向ずつ個別に計算できることを文献<sup>2)</sup>(その2)で明らかにした。また、この形状の流体運動は、桶あるいは箱形水槽の場合のスロッシング運動と異なり、水平部と立ち上がり部を流れる水の運動としてとらえることができ

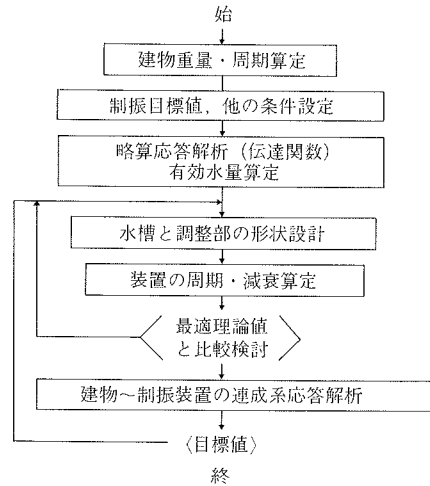
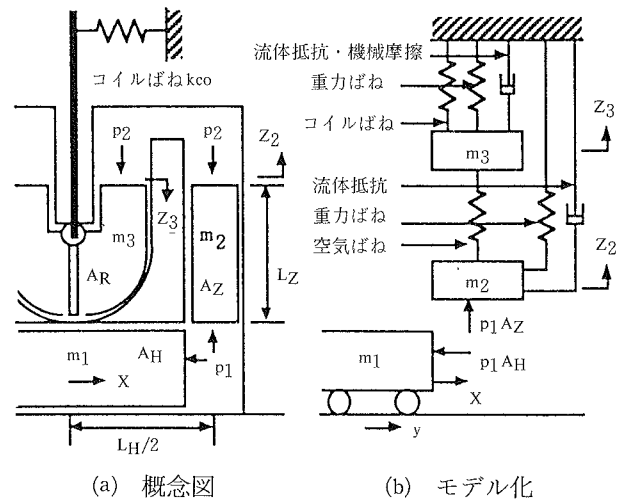


図-10 制振装置の設計フロー



(a) 概念図 (b) モデル化

図-11 制振装置の振動モデル化

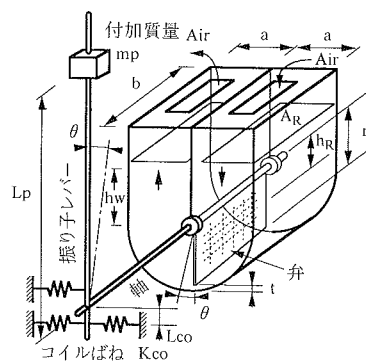


図-12 周期調整部詳細

る。従って、図-3の断面構造より図-11(a)に示すような概念で水平部と立ち上がり部の水を質量化して、同図(b)のようなモデル化が可能となる。

この運動方程式は、立ち上がり部の水変位  $Z_2$  を流体の連続性から水平部変位  $x$  で表すと、この変位  $x$  と周期調整部の水の上下変位  $Z_3$  を自由度とする式(1)に示すような2自由度系で表される<sup>2)</sup>。

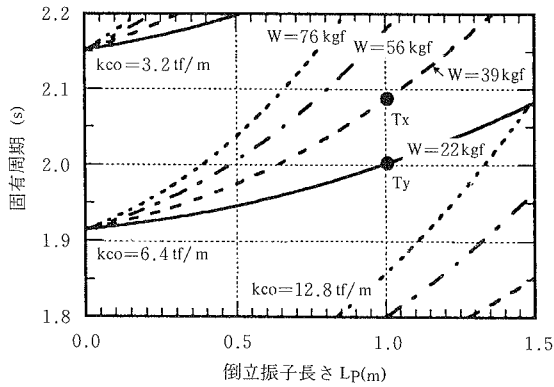


図-13 制振装置の固有周期特性(A 建物)

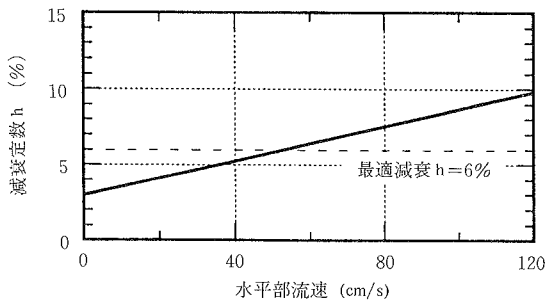


図-14 制振装置の減衰特性(A 建物)

$$M_m \ddot{X} + C_m \dot{X} + K_m X = -D_m \dot{y} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

$$M_m = \begin{bmatrix} \rho A_H L_H + 2\rho A_z L_z (A_H/A_z)^2, & 0 \\ 0, \rho A_R L_R + m_p L_p^2/h_R^2 + m_v, & \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

$$C_m = \begin{bmatrix} (8/3\pi)(\rho A_H/2)\zeta_H V_H, & 0 \\ 0, & (8/3\pi)(\rho A_R/2)\zeta_R V_R + C \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

$$K_m = \begin{bmatrix} 2\rho g A_H^2/A_z + (2np_0/Q)A_H^2, & -(2np_0/Q)A_H A_R \\ -(2np_0/Q)A_H A_R, & 2\rho g A_R + (2np_0/Q)A_R^2 + m_v g/h_R \\ & -m_D g L_p/h_R^2 + k_{c0}(L_{c0}/h_R)^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(4)$$

$$D_m = \begin{Bmatrix} \rho A_H L_H \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(5), \quad X_m = \begin{Bmatrix} X \\ Z_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $A_H, L_H$ ：水平部、 $A_z, L_z$ ：立上がり部、 $A_R, L_R$ ：周期調整部(図-12)、それぞれの断面積と有効長さ、 $m_p, L_p$ ：倒立振子の質量と長さ、 $m_v, h_R$ ：弁質量と編心距離、 $\zeta_H, \zeta_R$ ：水槽と周期調整部の流体損失係数、 $V_H, V_R$ ：水平部と周期調整部の流速、 $k_{c0}, L_{c0}$ ：コイルばね定数と編心距離、 $Q$ ：空気容積、 $p_0$ ：大気圧、 $n$ ：比熱比、 $\rho$ ：水単位質量、 $g$ ：重力加速度である。

この運動方程式を用いて A 建物の装置の固有周期解析結果を図-13に示し、●印が同調した値である。ここでは  $k_{c0}=6.4$  tf/m のコイルばねを選択し、次に現地で倒

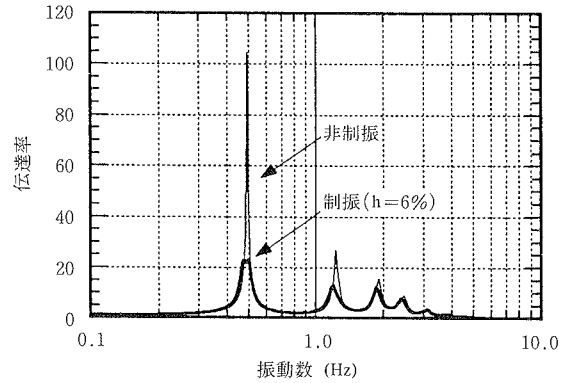


図-15 非制振, 制振建物の伝達関数(A 建物)

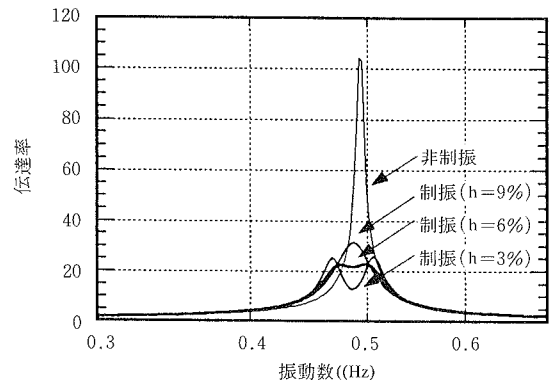


図-16 装置の非線形減衰と伝達関数の関係

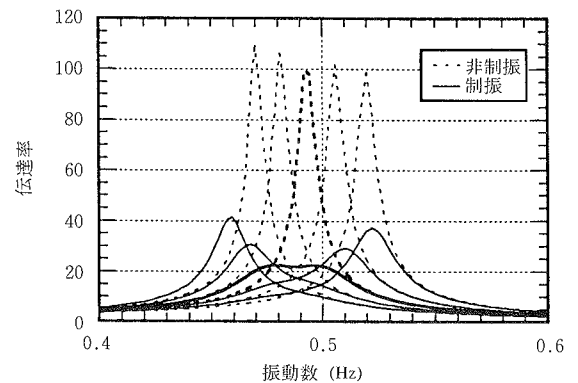


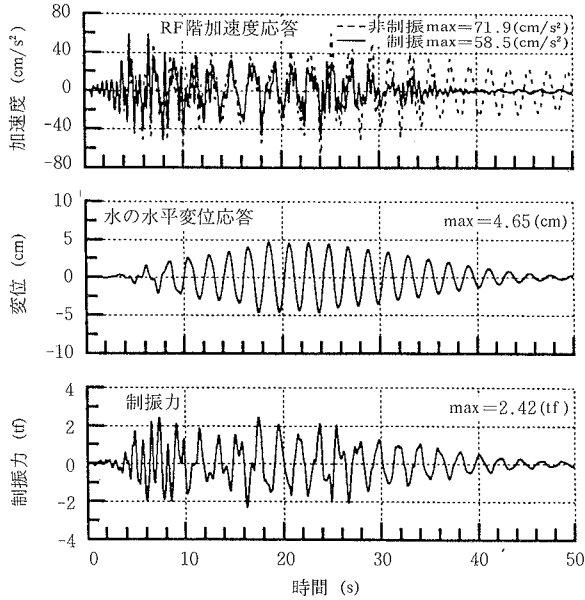
図-17 建物の固有周期変化と伝達関数の関係

立振子の重りの重量  $W$  を短辺 X 方向用  $W=39$  kgf、長辺 Y 方向用  $W=22$  kgf、軸からの距離を  $L_{c0}=1.0$  m として周期の微調整を行ったものである。

装置の減衰に関しては、水槽、空気層、周期調整部の各々について流体の管路抵抗として考慮した。この損失係数  $\zeta$  は主に次のような管路抵抗要素を考慮する。

- ① 水槽：壁面摩擦、曲がり抵抗
- ② 空気層：オリフィス抵抗
- ③ 周期調整部：ばね部と軸受け部の機械摩擦外

これらの管路抵抗による減衰は、速度  $V_H, V_R$  の 2 乗に比例する非線形減衰であり、式(3)の  $[C_m]$  に  $\zeta_H, \zeta_R$  として考慮されている。また、周期調整部の機械摩擦抵抗は、A~C 建物用の調整部単体の振動台実験結果から、適用レベルの範囲内ではほぼ速度の 1 乗に比例する減衰定数



図一18 八戸地震波 max 16.5 cm/s<sup>2</sup> 入力に対する建物屋上階、水と制振力の応答波形

$h = 8 \sim 10\%$ が計測され、これを式(3)の  $[C_m]$  の末尾に  $C$  の項として考慮されている。

この結果、装置の減衰特性は図一14に示すようになり、ある初期減衰を持って流体の速度とともに増大していく減衰特性となる。以上解析方法で制振装置の流体周期と減衰特性を明らかにしたものである。

#### 4.3 制振建物の動特性

多質点系構造物と制振装置連成系の運動方程式は、 $\ddot{y}$  を地動入力、 $P_s$  を風外力とすると次のように表せる。

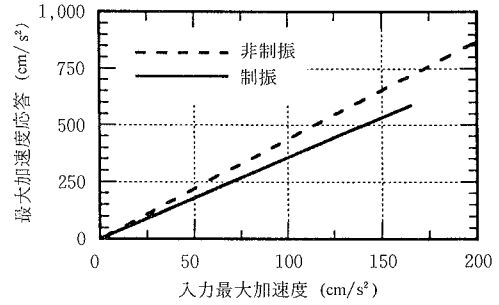
$$\begin{bmatrix} M_d & M_e \\ M_e & M_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_m \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} D_d \\ D_m \end{Bmatrix} \ddot{y} + \begin{Bmatrix} P_s \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、

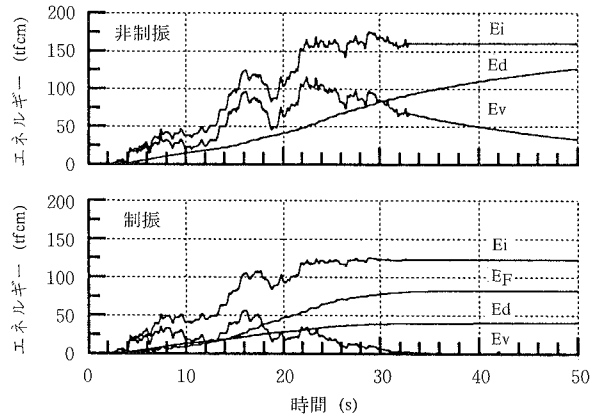
$$M_d = M_s + \begin{bmatrix} \rho A_H L_H & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_e^T = \begin{bmatrix} \rho A_H L_H & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

$$D_d^T = D_s^T + [\rho A_H L_H, \dots, 0] \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 $M, K, C, x, D$  の添字  $s$  は構造系、 $m$  は制振装置系を表す。この運動方程式をもとに A 建物短辺方向の解析例を次に示す。①外力項  $P_s = 0$  として、地動入力に対する屋上階の伝達関数を図一15に示す。この図より非制振建物と装置が最適減衰 6% の制振建物を比較して、1 次の共振応答倍率が 1/5 に低減し、高次振動に対しては増幅という悪影響は及ぼしていないと言える。②制振装置の非線形減衰性 (図一14) による影響は、微小振幅時の 3% と大振幅時の 9% の場合の伝達関数で検討した。図一16より大振幅時に装置が過大減衰になったとしても、1/3 程度の 1 次共振伝達率の低減は期待できる。また、③建物の固有周期が変化する場合を想定して、制振装置の



図一19 八戸地震波の入力レベルと建物屋上階の応答加速度の関係



図一20 八戸地震波入力時の振動エネルギー消費割合

特性 (最適同調値) は変えずに、建物周期を破線で示すように  $\pm 3\%, \pm 6\%$  変えた時の伝達率を図一17に示す。この図より最小伝達率約 20 が  $\pm 6\%$  の周期変動で約 40 となるが、非制振時の約 100 と比べてまだ小さい。以上の結果、入力レベルの大きさや、建物周期の若干の変動は、制振建物の動特性に著しい影響を及ぼすものではないと言える。

#### 4.4 地震時の応答

以上の特性を持つ A 建物の短辺 X 方向を対象に、地震時の非制振建物と制振建物の応答を比較検討する。入力地震波としては、建物に共振するやや長周期成分を含む 1968 年十勝沖地震八戸港湾記録地震波 max 16.5 cm/s<sup>2</sup> (約 2.5 cm/s) を用いる。建物の応答加速度、水槽の水変位と水慣性力 (制振力: 式(11)の  $F$ ) の時刻歴応答解析結果を図一18に示す。この図より実線で示す制振建物では、初期の主振動の若干の応答低減とともに、建物が 1 次振動で共振し始めた時の顕著な低減効果が認められる。

次に、入力レベルを最大約 170 cm/s<sup>2</sup> (25 cm/s) まで変えて応答解析を行った。その時の入力レベルと最大応答加速度の関係を図一19に示す。この図より最大応答加速度の低減率は入力レベルによらずほぼ一定であり、装置減衰の非線形性 (図一14) の影響は比較的現れ難いことが分かる。なお、この A 建物の水槽の立ち上がり部のストローク  $\pm 72$  cm は、25 cm/s 入力時の水応答変位  $\pm 70$  cm を満たすものである。

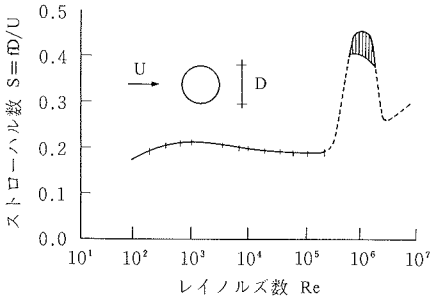


図-21 円柱のストローハル数

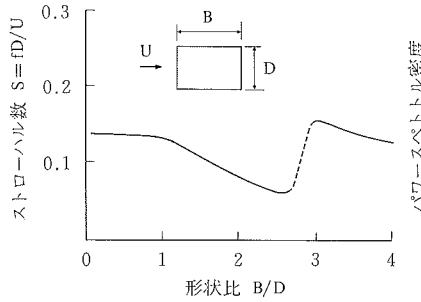


図-22 矩形断面柱のストローハル数

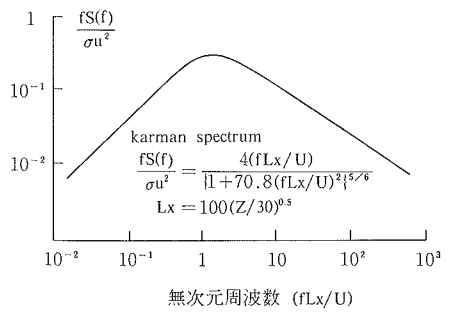


図-23 変動風のパワー  
スペクトル密度

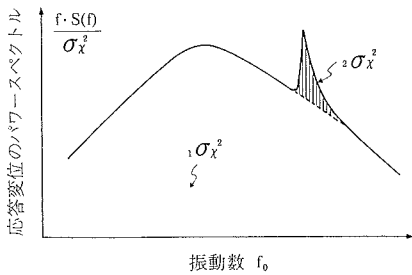


図-24 応答変位のパワー  
スペクトル密度

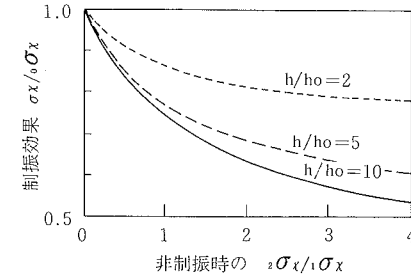


図-25 全周波数域の振動に対する  
制振効果

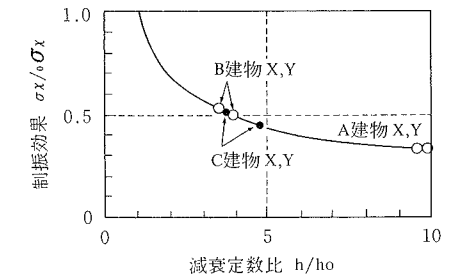


図-26 共振成分に対する  
制振効果

さらに、エネルギー的な観点から地震波入力時の制振効果を検討した。制振建物の地動入力に対する運動方程式は、建物のみに着目すると次式のように表せる。

$$Ms\ddot{x} + Cs\dot{x} + Ksxs = -Ds\ddot{y} + F \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$F = \rho A_H L_H (\ddot{x} + \ddot{x}_{SR} + \ddot{y}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、F は制振力を表し、非制振建物の場合は F=0 である。また、x、x<sub>SR</sub> は各々水槽の水平部の水、水槽設置 R 階の応答加速度である。この運動方程式に応答速度をかけて時間で積分することにより、式(12)のエネルギーの関係式が得られる。

$$E_v + E_d = E_i - E_f \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、E<sub>i</sub> は入力エネルギー、E<sub>v</sub> は建物弾性振動エネルギー、E<sub>d</sub> は建物固有の減衰吸収エネルギー、E<sub>f</sub> は制振装置の吸収エネルギーを表す。

前述の地震波を入力したときの時刻歴応答をエネルギー的に見た結果を図-20に示す。上図は非制振建物の場合、下図は制振建物の場合である。この両図を見ると、制振建物の E<sub>i</sub> は非制振建物のその75%に低減され、E<sub>v</sub> は10秒付近から著しく減じはじめていく様子がわかる。また、30秒後のエネルギー分担を見ると、制振建物は入力エネルギー E<sub>i</sub> のうち、1/3は建物の減衰 E<sub>d</sub> に吸収され、残りの2/3は制振装置 E<sub>f</sub> によって吸収されていることが分かる。以上の結果、本装置は水が動きはじめるとその後のエネルギー吸収性が極めて良いことがわかる。

4.5 風外力応答と制振効果

建築構造物が風により励起される振動は、発生要因により、表-3の様に分類できる。そして、構造物がいずれ

表-3 風励起振動の分類

現象	原因
バフエーティング振動	変動する風の影響
渦励起振動	構造物背後から発生する渦の影響
空力不安定振動 (ギャロッピング)	構造物が振動することにより付加的に発生する負の空力減衰の影響

の要因の影響を受けて振動するかは、風の変動特性や構造物の形状、振動特性に大きく依存する。

過密な都市に建つ中高層建築構造物の場合においては、吹きつける風が乱れていることによるバフエーティング振動と渦励起振動に着目する必要がある。

渦励起振動は、風の吹きつける方向に対して直交する方向に構造物が振動するもので、発生する渦の周波数特性は形状に大きく依存する。この関係は、ストローハル数として以下の式(13)で定義される。

$$S = fD/V \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここで、S：ストローハル数、f：周波数(Hz)、D：代表寸法(m)、V：風速(m/s)である。

二次元断面形状が円の場合と、矩形の場合のストローハル数としては、図-21、22等の報告例<sup>3),4)</sup>があるので、これらを参考にして構造物の渦励起振動が設計風速の範囲内において発生するかを検討する。共振風速を予測することは、さらに実状に近い状況を再現して詳細な評価を行うか否かを判断する決め手となる。

バフェテング振動は、吹きつける風の風速変動により振動するものである。図-23に示す風速変動の標準化されたパワースペクトル密度<sup>9)</sup>は、地上高さ数百 m では数秒から数十秒にスペクトルピークがあり、これより高い周波数領域では徐々にエネルギーが小さくなる傾向にある。このことは、渦励起振動の可能性と同様、建築構造物の周期が長い程、風の影響を受けやすいと言うことである。ただし、風の風速変動から風外力を予測するには形状特性である空気力係数や空力アドミッタンスの評価が重要となる。すなわち同じ風環境下であっても、構造物の形状が異なれば、外力は異なった特性となるのである。

ところで、風により励起される振動の予測は、風外力の評価方法に依存するが、①時間領域での予測と、②周波数領域での予測のいずれでも可能である。時間領域での応答予測については著者等<sup>9)</sup>によりすでに示したので、周波数領域での応答予測について記述する。

周波数領域での応答予測では、1次振動が卓越するとしてスペクトルモーダル法を適用する。図-24にその概念を示すが、建築構造物の応答スペクトルを非共振成分と共振成分に分離して、次式により応答を評価することができる。この解析法においては、風外力の周波数特性の正確な把握が、応答予測結果の妥当性を左右する。

$$\sigma_x = (\sigma_x^2 + \sigma_x^2)^{1/2} = \sigma_F (1 + \pi / (4h) f_0 S_F(f_0) / \sigma_F^2)^{1/2} / K \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $\sigma_x$ ：応答の標準偏差、 $\sigma_x$ ：非共振成分の標準偏差、 $\sigma_x$ ：共振成分の標準偏差、 $\sigma_F$ ：風外力の標準偏差、 $K$ ：構造物の剛性、 $h_0$ 、 $f_0$ ：構造物の減衰定数と固有振動数、 $S_F(f_0) / \sigma_F^2$ ：外力の無次元パワースペクトル密度の固有振動数成分である。

制振装置による振動減衰効果を3.2に記述したように、建築構造物の減衰定数として組み込むことのできるのであれば、制振装置を設置した建築構造物の応答は、上記式でその効果を確認することができる。

仮に制振建物の減衰定数  $h$  が期待できるとすると、全周波数領域での非制振  $\sigma_x$  に対する制振効果  $\sigma_x / \sigma_x$  は図-25のようになる。減衰が10倍ほど大きくなったとしても、共振成分の割合が少ないと制振効果は期待できず、共振成分が非共振成分に対して3~4倍の状況であったとしても制振効果としては約50%の低減にとどまる。しかし、共振成分（固有振動数成分）だけをとりだすと図-26となり、減衰定数を4倍高めると50%、減衰定数を10倍高

めると32%まで制振効果を期待できると予測される。図中にはA~C建物のこの制振効果を示した。

居住者の居住性改善効果については、ランダム振動に対する感覚は十分に把握されているわけでないので、上記した制振効果が風揺れに対して効果を示すか否か不明ではある。しかし、少なくとも単一周期振動に対する居住性の改善は、適切な装置の設計により、十分に期待されると判断できる。

## 5. まとめ

流体式制振装置(MOVICS)は、長周期構造物の振動減衰性を高め、共振振幅を抑制するのに役立つものであることを、3つの適用建物の実験データと解析結果から示した。また、実験結果に整合する解析法を用いて、制振建物の地震応答解析と風応答解析を行い、制振装置の有効性を示した。なお、制振装置の流体周期と減衰特性の解析に当たり、流体の連続性を考慮する考え方で簡便な2自由度系モデルに置換する方法を提案した。これらの建物では強風観測と地震観測を開始したので観測後に報告する予定である。

## 謝 辞

本装置の製作に当たり、共同研究している三菱重工業(株)長崎研究所、藤田一誠氏、山崎幸治氏、長崎造船所造船設計部塩崎政和氏、吉村光弘氏らに多大なご協力を賜りました。また、本研究は(株)大林組の制振技術開発テーマの一環として、設計第十二部清水部長、建築設計第六部板垣部長、エンジニアリング部奥井副部長、大熊課長らと実施し、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説、(1991)
- 2) 寺村 彰、岡田 宏、清水敬三、他：凹型水槽制振装置の開発研究(その1)、大林組技術研究所報、No. 45, p. 83~88, (1992.8)、同題(その2)、No. 49, p. 37~44, (1994.8)
- 3) 岡内 功、伊藤 学、宮田利雄：耐風構造、丸善、125p.
- 4) 岡内 功、伊藤 学、宮田利雄：耐風構造、丸善、257p.
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、(1991)
- 6) 川口彰久、寺村 彰、表 佑太郎、安井 讓：時刻歴風応答解析とTMDの制振効果について、大林組技術研究所報、No. 43, p. 1~6, (1991.8)