

低コスト型流体式制振装置MOVICS®-2の開発

石川 理都子 吉田 治
関 松太郎

Low Cost Vibration Control System Using U-shaped Water Tank: MOVICS®-2

Ritsuko Ishikawa Osamu Yoshida
Matsutarou Seki

Abstract

MOVICS is a vibration control systems that reduces structural responses to improve living comfort in high-rise buildings. This system uses resonance of water sloshing in a U-shaped water tank whose natural period is adjusted to that of the main structure. One challenging issue is to control the structural responses in both horizontal directions with a single water tank. The prototype MOVICS-1 uses extra small U-shaped water tanks to adjust the natural period in both horizontal directions separately. However, this increases the manufacturing cost. To assess this problem, a new type MOVICS-2 has been developed. MOVICS-2 adjusts its natural period by changing the sectional area of the upright portion of the U-shaped water tank, thus eliminating the need for extra water tanks. In addition, this new device has the potential to have a longer natural period than the prototype, so it is more appropriate for installation in super-high-rise buildings. This paper proposes a design formula for calculating the natural period of MOVICS-2 by examining the measured results of devices installed in an office building. The damping effect of water sloshing, including fluid resistance of the water tank and supplemental damping devices submerged in the tank, is also examined analytically.

概 要

MOVICSは、凹字型水槽内の水と建物の固有周期を同調させることにより、高層建物の揺れを低減し居住性を向上させる制振装置であり、1台の水槽で水平2方向の揺れを同時に低減することが特徴である。従来のMOVICS-1では、水平2方向の周期を別々に調整するために、小型の補助水槽を用いた周期調整装置が必要であり、この部分がコスト増加の要因となっていた。そのため、周期調整装置に替えて、水槽立上り部に設けた小区画により断面積を変化させて周期調整を行う新型MOVICS-2を開発した。これによりコストダウンを実現するとともに、従来型よりも長周期の建物に適用できるようになった。本報では、オフィスビルに適用した実際の装置に関して、事前解析および設置後の測定により周期調整機能を検証し、実用的な周期予測式を提案した。さらに、水槽本体の流体抵抗と減衰付加材の特性を考慮して、MOVICS-2の減衰性能について解析的な検討を行い、制振設計の基礎資料を提供する。

1. はじめに

流体式制振装置MOVICSは大型水槽内の水を重量体とするパッシブタイプの周期同調型制振装置で、水平2方向の周期を独立に設定することが可能であり、駆動装置を必要とせず、水槽内の水を消火用水や非常用設備用水として有効利用できるという特徴をもっている。

1992年に開発されたMOVICS-1^{1)~4)}は凹字型の水槽と小型の補助水槽を用いた周期調整装置を通気管で接続したもので、コイルばねの抵抗力と水槽の形状および水量を調整することにより水の固有周期を建物の1次固有周期に同調させ、水平2方向の振動を同時に抑制する仕組みとなっている。

MOVICS-1は既に3棟の建物に適用されているが、装置全

体が密閉されているため空気圧により水の固有周期が短くなり、適用範囲は2秒前後の建物となること、および周期調整装置の製作にコストがかかる点に問題があった。そこで、周期調整装置に替えて、水槽立上り部の断面積を変化させて周期調整を行う方法を採用してコストダウンを実現するとともに、水槽内の空気を外気に開放することにより長周期の建物に適用可能となるMOVICS-2を開発した⁵⁾。

ここでは、新築オフィスビルに適用したMOVICS-2について、事前解析および設置後の測定により、断面積および水量と水の固有周期との関係式を導き、周期予測式とした。また、水槽本体の流体抵抗と減衰付加材の特性を考慮して、減衰性能について解析的な検討を行った。これらの結果について以下に報告する。

2. 制振装置の概要

Fig. 1にMOVICSの概要図を示す。建物の固有周期は非構造部材の影響などで竣工後時間の経過とともに変化するが、水槽の形状は製作時に決まっており、水量は2方向独立に制御できないため、常に最適な同調状態を保つためには周期調整機構が不可欠となる。MOVICS-1では各辺中央部に設けた補助水槽内の周期調整弁の抵抗力を調整することにより、水平2方向独立に周期調整が可能となっている。一方、MOVICS-2では立上り部を小区画に分け一部に周期調整蓋を設置して断面積を変化させることにより周期を調整する仕組みとした。

MOVICS-1の場合、装置全体が密閉されていることによる空気圧と周期調整部の流体抵抗によって装置自体が十分な減衰を有していたが、MOVICS-2のような開放型の場合、水槽本体の流体抵抗による減衰はほとんど期待できない。そのため、調整蓋設置場所の下部に減衰付加材としてPhoto 1に示すヘチマロン（新光ナイロン社）を設置することとした。

ヘチマロンは線状の合成樹脂を立体網状体に整形したもので、通常は土木用の排水材や濾過材として用いられているが、金網やパンチングプレートと比較して抵抗力の流速依存性が少なく、軽量で扱いも容易であることから、船舶の波浪による揺れを低減する制振水槽にも採用されている。

3. 制振装置の振動特性

3.1 基本原理

MOVICS-2を設置した建物の応答は、鉄やコンクリートを重量体とするTMDの場合と同様に考えることができる。TMD理論⁶⁾によれば、付加質量をもつ振動体を建物の上部に設置し、その固有周期を建物の1次固有周期に同調させることで、振動エネルギーをTMDに吸収することができる。

建物とTMDの2質点系伝達関数より、最適なTMDの固有周期 T_{opt} と減衰定数 h_{opt} が以下のように与えられる。

$$T_{opt} = (1 + \mu)T_0$$

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (1)$$

μ : TMDと建物の有効質量比

T_0 : 建物の1次固有振動数

通常TMDによる慣性力は重量体の質量、復元力は重量体を支える積層ゴムなどによって与えられる。MOVICSの場合、外力を受ける有効質量として働くのは水平方向に振動する水平部の水のみであるが、復元力が立上り部の水位変化により、慣性力が水槽内全体の流速変化（加速度）によって発生するため、MOVICSの性状を表す運動方程式は、一般のTMDとは若干異なったものとなる。

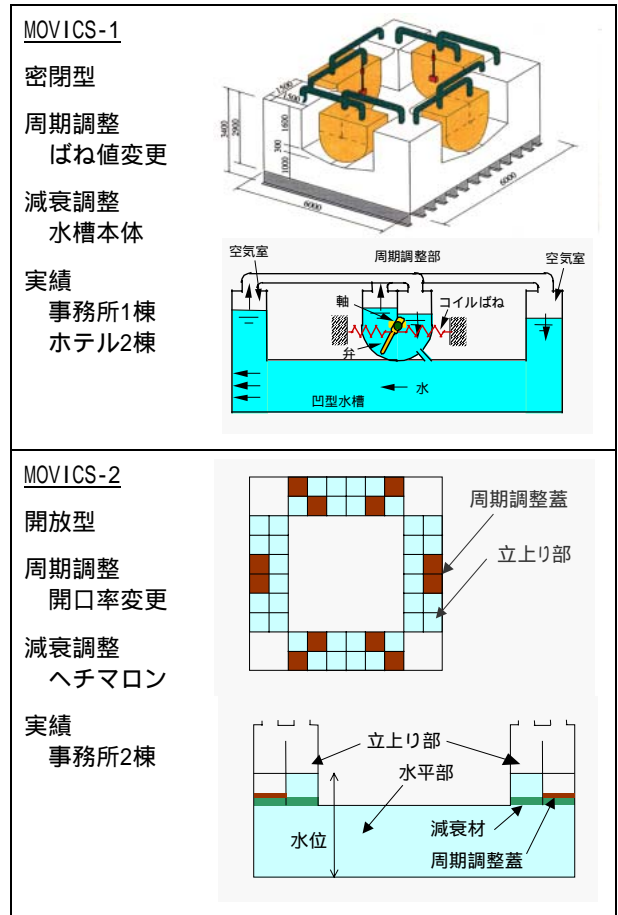


Fig. 1 流体式制振装置の概要
Schematic of MOVICS



Photo 1 減衰付加材ヘチマロン
Supplemental Damping Device "Hechimaron"

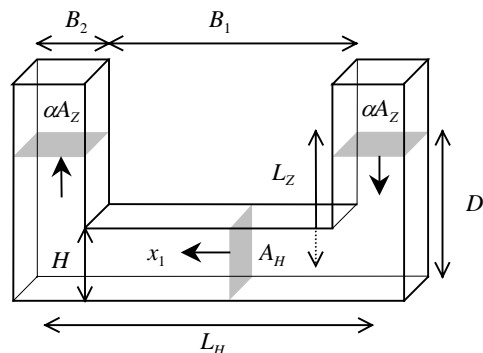


Fig. 2 凹字型水槽解析モデル
Analytical Model of Water Sloshing in a U-shaped Tank

3.2 周期予測式

Fig. 2に示す凹字形水槽内の流水の運動方程式と固有周期は次式で表される。

$$\left\{ A_H L_H + 2 \frac{A_H^2}{\alpha A_Z} L_Z \right\} \ddot{x}_1 + 2g \frac{A_H^2}{\alpha A_Z} x_1 = -A_H L_H \ddot{y} \quad (2)$$

- A_H, A_Z : 水平部・立上り部全断面積
- L_H, L_Z : 水平部・立上り部有効長さ
- g : 重力加速度
- x_1 : 水の水平変位
- α : 立上り部開口率

$$\text{固有周期 } T = 2\pi \sqrt{\frac{2L_Z + (\alpha A_Z / A_H) L_H}{2g}} \quad (3)$$

ここで、水平部有効長さ L_H は、外側の開口率を α_1 、内側の開口率を α_2 として、Fig. 2の B_1, B_2 を用いて次式で表される立上り部の重心間距離とする。

$$L_H = B_1 + 2B_2 \cdot \frac{0.75\alpha_1 + 0.25\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (4)$$

立上り部有効長さ L_Z については、水面から水平部上面までとする考え方と、水平部中央までとする考え方がある。汎用FEM解析システムADINAにより、3次元流体要素を用いて水槽内の水をモデル化し固有値解析を行った結果、Fig. 4のように開口率が小さいほど有効長さを短めにした方がFEMの結果に近くなる傾向が得られた。

そこで、東京都内の新築オフィスビルに設置したMOVICS-2について、開口率と水位を変化させて周期測定を行い、水位・開口率と固有周期の関係式を実験的に導くこととした。測定結果をFig. 5に記号で示す。この結果から、水位・開口率と固有周期の関係式を次式で表すこととし、その値を図中に実線で示す。

$$L_Z = D - (0.75 - 0.15\alpha)H \quad (5)$$

- D : 底面からの水位
- H : 水平部の高さ
- α : 開口率

ただし、上式の定数はMOVICS-2の形状によって異なる場合もあるため、計画時には定数に幅をもたせて周期調整範囲を検討しておく必要がある。

3.3 制振装置の減衰性能

MOVICS-2の減衰要素として以下のものが考えられる。

- 1) 水槽の壁面抵抗
- 2) 直角部抵抗 (立上り部と立上り部の角度変化)
- 3) 断面急拡大による抵抗 (立上り部 水平部)
- 4) 断面急縮小による抵抗 (水平部 立上り部)
- 5) ヘチマロンによる抵抗

このうち、1)~4)は流速が極めて小さい場合を除いて流速の2乗に比例する抵抗力となる。一方、5)のヘチマロンによる抵抗力は製造元の実験結果より流速の1.789乗に

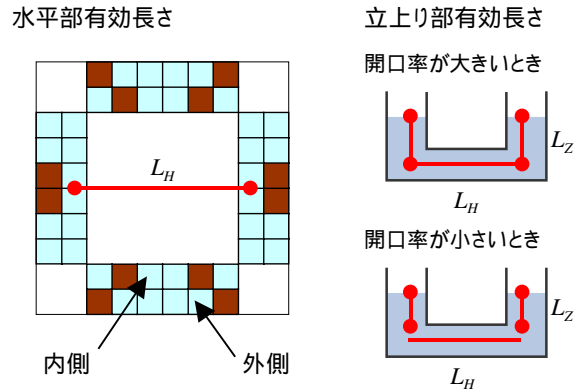


Fig. 3 有効長さの考え方
Modeling of Equivalent Length for Water Sloshing

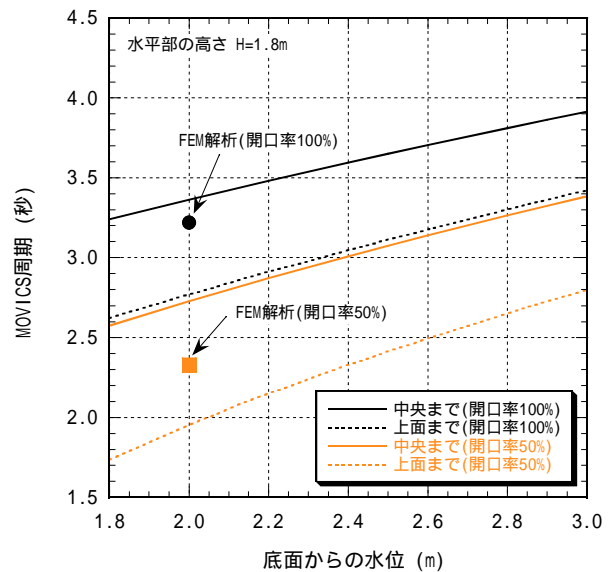


Fig. 4 立上り部有効長さの取り方による周期比較
Natural Period Due to Effective Water Depth

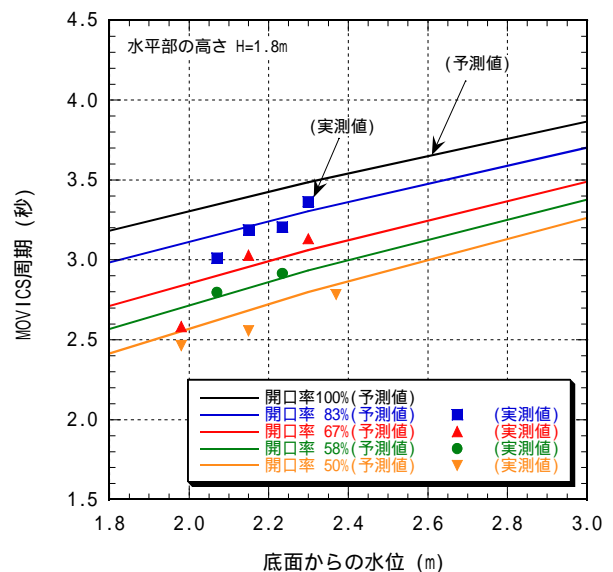


Fig. 5 水位・開口率と固有周期の関係
Natural Period Due to Water Depth and Opening Area

比例することが確認されている。

ヘチマロンの厚さ d および水槽の形状より、1) ~ 4) による係数 c_2 と5)による係数 c_1 を用いて、水平部の流速 \dot{x}_1 と水槽全体の減衰力 R との関係が次式で表される⁷⁾。

$$R = c_1(\dot{x}_1)^n + c_2(\dot{x}_1)^2 \quad (6)$$

$$c_1 = 3.8308 \rho g d \frac{A_H^{n+1}}{(\alpha A_Z)^n}, \quad n = 1.789$$

$$c_2 = \frac{10^{-2} \rho A_H \sqrt{\pi}}{2} \left[\frac{L_H}{\sqrt{A_H}} + \frac{2L_Z}{\sqrt{\alpha A_Z}} \left(\frac{\alpha A_Z}{A_H} \right)^2 \right] + \frac{\rho A_H}{2} \left[2 \left(\frac{A_H}{\alpha A_Z} - 1 \right)^2 + (2 + \zeta) \frac{A_H}{\alpha A_Z} \right]$$

ここで、 ζ は断面急縮小時の損失係数であり、次式で近似できる。

$$\zeta \cong 0.4726 - 0.4765 \frac{A_Z}{A_H} \quad (7)$$

4. 制振建物の振動特性

4.1 流体抵抗を考慮した運動方程式

前項の減衰力を考慮すると、MOVICS-2を設置した建物の運動方程式は次式のように非線形減衰を含む形となる。

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{x}_0 + m_1 (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1) + c_0 \dot{x}_0 + k_0 x_0 &= -(m_0 + m_1) \ddot{y} \\ m_1 (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1) + m_2 \dot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1)^n + c_2 (\dot{x}_1)^2 + k_1 x_1 &= -m_1 \ddot{y} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、

$$m_1 = \rho A_H L_H$$

$$m_2 = 2\rho \left(\frac{A_H^2}{\alpha A_Z} \right) L_Z$$

$$k_1 = 2\rho g \left(\frac{A_H^2}{\alpha A_Z} \right)$$

\ddot{y} : 入力加速度

x_0 : 建物の水平変位

m_0 : 建物の一次有効質量

k_0, c_0 : 建物の剛性, 減衰

x_1 : 水の水平移動量

m_1, k_1 : 水の有効質量, 復元力

c_1, c_2 : 水の減衰係数

ρ : 水の単位体積質量

4.2 自由振動波形による減衰評価方法

MOVICS-2の減衰が非線形であるため、微小な振動に対しては装置の減衰が最適値よりも小さくなる。一般的に、周期同調型制振装置を設置した建物の自由振動波形は、装置の減衰が小さい場合にはFig. 6に実線で示すようにビートを含んだものとなり、地動入力に対する伝達関数はFig. 7のように近接する2つのピークをもつ。

このような連成多自由度系の減衰評価法としては一般的に確立されたものはないが、いくつかの方法で評価した減衰定数から等価な1自由度系の応答を求め、その包絡

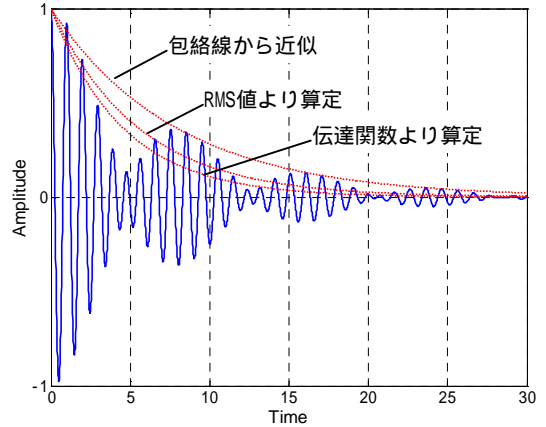


Fig. 6 制振建物の自由振動波形
Free Response of Controlled Structure

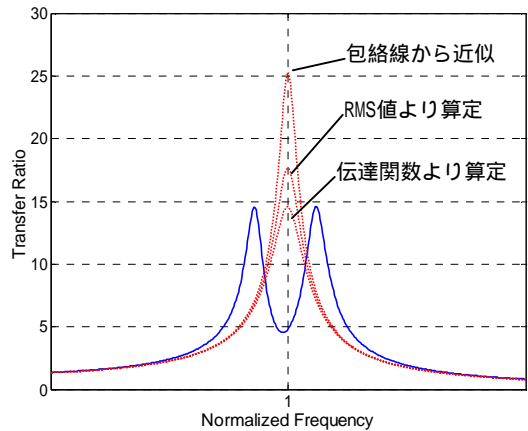


Fig. 7 制振建物の伝達関数
Transfer Function of Controlled Structure

線と伝達関数をFig. 6とFig. 7に点線で示した。

通常自由振動波形の減衰を評価するには、波形の包絡線から近似する方法と、伝達関数のピーク高さから求める方法があるが、このように装置減衰が小さい場合には両者の差異が大きくなる。包絡線から近似した場合には、ビートの谷間における応答減少を無視したものとなり、過小評価と考えられ、一方伝達関数から求めた場合には、ピーク近傍も含めた応答で見ると若干過大評価になっていると考えられる。

そこで、このような波形を用いて減衰を評価する方法として、等価なRMS値をもつ1質点系自由振動波形の減衰値を採用することを提案する。

初期振幅 X_0 、円振動数 ω 、減衰定数 h の自由振動波形は次式で表される。

$$x(t) = X_0 e^{-h\omega t} \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \quad (9)$$

ここで、 $\sqrt{1-h^2} \omega T = 2n\pi$ とおくと時刻 T までのRMS値は次式となる。

$$X_R = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{X_0^2 (1+h^2) (1-e^{-2h\omega T})}{4h\omega T}} \quad (10)$$

評価時間 T が十分に長いものとし、減衰定数が小さいことを考慮すると、初期値とRMS値から減衰定数 h_{eq} を求める式が以下のように求められる。

$$h_{eq} = \frac{1}{8n\pi} \left(\frac{X_0}{X_R} \right)^2 \quad (11)$$

4.3 実建物の減衰評価例

MOVICS-2を適用したオフィスビルを対象に、減衰性能の予測を試みた。4.1節の運動方程式を用いて、建物に初期変位を与えて得られる応答加速度の自由振動波形と、その等価減衰定数から計算される減衰曲線をFig. 8に示す。

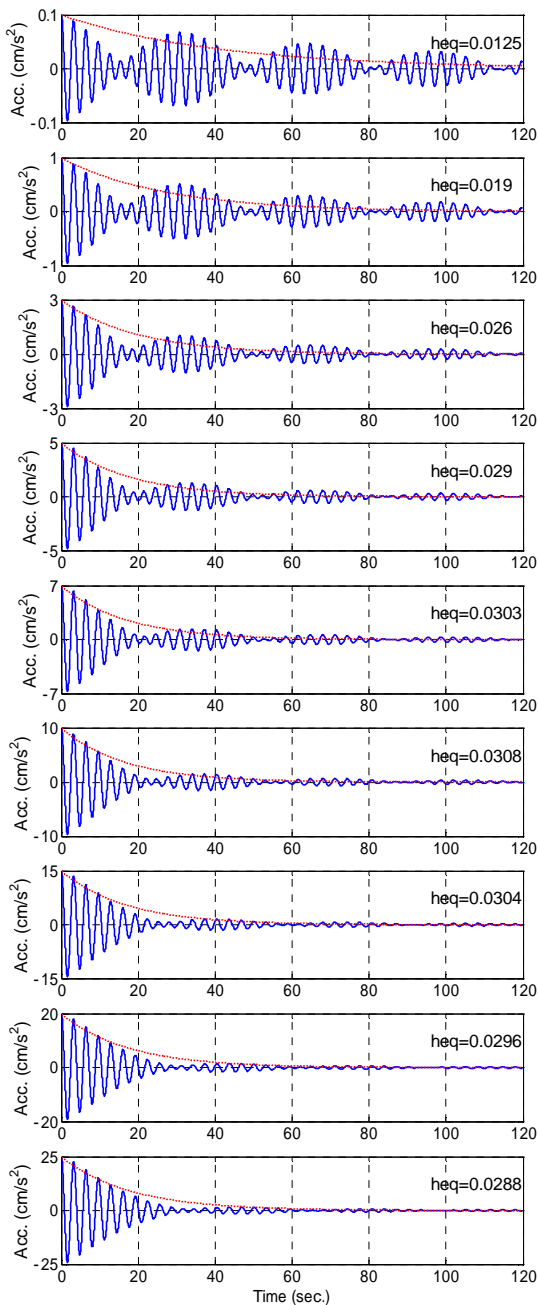


Fig. 8 制振建物の自由振動波形
Free Responses of Building with MOVICS

す。制振装置と建物の質量比は約1.8%，ヘチマロンの厚さは8.0cmとした。解析に用いた建物とMOVICS-2の諸元をTable 1に示す。等価減衰定数は初期加速度10galで最大となり、その後減少に転じる。

初期加速度と制振効果を含んだ等価減衰定数との関係を、ヘチマロンの量を0.5倍、1.5倍にした場合とあわせてFig. 9に示す。ヘチマロンの量が多いほど初期加速度の小さい段階で最適減衰に達し、微小振幅に対する減衰性能が高まる結果となっているが、等価減衰の最大値はヘチマロンの量に関わりなく約3%で一定となることがわかる。この値は、MOVICS-2の減衰を線形とし、質量比から求められる最適減衰定数

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} = 8.04\% \quad (12)$$

$$\mu = \frac{m_1}{m_0}$$

を与えた場合の等価減衰定数とほぼ一致する。また、最適減衰を越えた範囲での等価減衰定数の減少は緩やかであり、地震時においても比較的安定した減衰性能を確保できることが予測される。

Table 1 解析諸元
Parameters for Analysis

建物		
1次有効重量	W_0	10123 ton
1次固有周期	T_0	3.2 秒
減衰定数	h_0	1.0 %
MOVICS		
水平部断面積	A_H	14.4 m ²
水平部有効長さ	L_H	6.56 m
立上り部断面積	A_Z	7.68 m ²
立上り部開口率		83.3 %
水平部高さ	H	1.80 m
底面からの水位	D	2.35 m

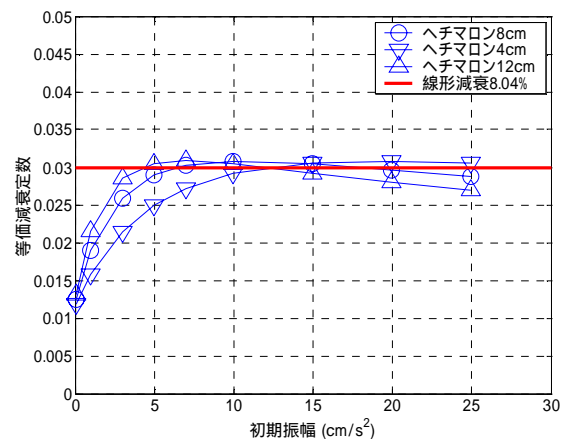


Fig. 9 減衰材の量による等価減衰定数の変化
Equivalent Damping Ratio Due to Supplemental Damping Device "Hechimaron"

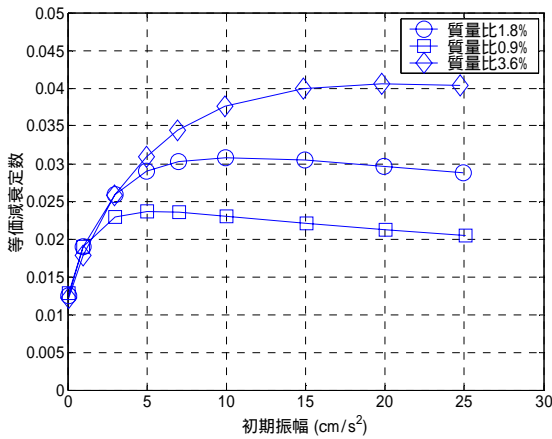


Fig. 10 設置台数による等価減衰定数の変化
Equivalent Damping Ratio Due to Effective Mass Ratio of MOVICS

次に、MOVICS-2の設置台数を变化させた場合の結果を同様にFig. 10に示す。設置台数の増加により、質量比が増すことで制振効果が高まり等価減衰が大きくなる一方、最適減衰が大きくなる影響で等価減衰が最大となる初期加速度が大きくなっている。

以上の傾向を考慮すると、MOVICS-2の設置計画にあたっては、必要とする周期調整範囲と減衰性能を勘案して形状と設置台数を定め、最大性能を発揮させる応答レベルに合わせてヘチマロンの量を調整することが可能になる。

5. まとめ

水槽立上り部に設けた小区画により断面積を変化させて周期調整を行う低コスト型流体式制振装置MOVICS-2について、実測結果より周期予測式を提案し、流体抵抗による減衰の特性を考慮して制振建物の減衰性能に関する解析的な検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 制振建物の等価減衰定数は応答レベルに依存する。
- 2) 等価減衰定数の最大値はMOVICS-2と建物の有効質量比によって定まる。
- 3) ヘチマロンの量を増やすことにより、最適減衰を得られる応答レベルを小さくすることができる。
- 4) 最適減衰を越える応答レベルに対する等価減衰定数の減少は緩やかであり、地震時にも比較的安定した減衰性能を確保できる。

謝辞

本装置の製作にあたり、共同開発者である三菱重工業株式会社の藤田一誠氏、吉村光弘氏らに多大なご協力を賜りました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 寺村，藤原，松岡，秋山：凹字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，pp.83～88，(1992)
- 2) 寺村：凹字型水槽制振装置の開発研究(その2)，大林組技術研究所報，No.49，pp.37～44，(1994)
- 3) 寺村，川口，吉田，岡田，安井：流体式制振装置(MOVICS)を付与した高層建物の動特性，大林組技術研究所報，No.50，pp.1～8，(1995)
- 4) A. Teramura and O. Yoshida: Development of Vibration Control System Using U-shaped Water Tank, Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1343, (1996)
- 5) 石川，寺村，藤田：流体式二方向制振装置MOVICS IIの開発，日本建築学会大会梗概集B-2，pp.673～674，(2002)
- 6) 武田寿一：構造物の免震・防振・制振，技報堂出版，pp.169～186，(1988)
- 7) 大橋秀雄：流体力学(1)，コロナ社，(1982)