

ハイブリッド型流体式制振装置の開発

吉田 治 寺村 彰

Development of Hybrid Tuned Liquid Column Damper

Osamu Yoshida Akira Teramura

Abstract

The authors have developed a vibration control system using a tuned Liquid Column Damper, which consists of a U-shaped water tank and Period Adjustment equipment (LCD-PA). This system can be used to reduce the movement of high-rise buildings due to wind loads or earthquake ones of medium strength. Three buildings have already been equipped with LCD-PA and effective vibration controls have been confirmed by earthquake and wind observations. This paper describes a hybrid control system with AC servo actuator attached to the LCD-PA that was developed to improve performance, and vibration tests were conducted to confirm the vibration control effects. As a result, vibration of the structural model was reduced to one-third of that without control, one-half of the passive type. A simulation produced almost the same results as the vibration tests.

概 要

著者らは、高層建物などにおいて、中小地震や風などによって生じる人が不快に感じる振動を抑制し、居住性の改善するための制振装置として、凹型水槽と周期調整装置からなるパッシブ型流体式2方向制振装置を開発した。この制振装置はすでに3物件に適用され、設置後の地震・風観測においても良好な制振効果が確認されている。今後は、建物が非常に揺れやすく、より大きな制振効果が要求される場合、あるいは制振効果はそれほど必要でなくても、建物の設置スペースの関係で、必要な装置の大きさが確保できないような場合がでてくる可能性がある。これらの要求に対応する一つの方法として、その流体式制振装置をACサーボモータでアクティブ制御するハイブリッド型の開発を行った。本報では、振動実験によりハイブリッド型流体式制振装置の制振性能を確認し、さらに解析による検証を行ったので、その結果について報告する。実験の結果、非制振に対して約3倍、パッシブ型に対して約2倍の制振効果を得られることが確認できた。また、実験結果を解析によって検証したところ、実験結果と解析結果はおおむねよく一致し、予測どおりの制振性能が得られた。

1. はじめに

著者らは、高層建物などにおいて、中小地震や風などによって生じる人が不快に感じる振動を抑制し、居住性の改善するための制振装置として、凹型水槽と周期調整装置からなるパッシブ型流体式2方向制振装置を開発した。この制振装置は既に3物件に適用され、設置後の地震・風観測においても良好な制振効果が確認されている^{1)~3)}。

この流体式制振装置の特長としては、

- 1) 水の自然な流れを利用しているため、微振動から効果を発揮できる
 - 2) 一つの水槽で、建物2方向の振動を抑制できる
 - 3) 防災水槽と兼用できる
- などがあげられる。

この流体式制振装置は、建物の頂部に設置し、建物の振動に流体式制振装置の水の振動を同調させて制振す

る、いわゆるパッシブ型の制振装置であるため、その制振性能は建物重量に対する水の有効重量の比で決まってしまう。すなわち、制振効果を高めるためには、より多くの水が必要となり、装置自体も大きくなる。

今後は、建物の超高層化に伴い、建物が非常に揺れやすく、より大きな制振効果が要求される場合、あるいは制振効果はそれほど必要でなくても、建物の設置スペースの関係で、必要な装置の大きさが確保できないような場合がでてくる可能性がある。

これらの要求に対応する一つの方法として、パッシブ型の流体式制振装置に駆動装置を付与し、水の動きを強制的にパッシブ時よりも大きく動かすことによって、さらに制振性能を向上させるハイブリッド型流体式制振装置の開発を行った。

本報では、振動実験によりハイブリッド型流体式制振装置の制振性能を確認し、さらに解析による検証を行ったので、その結果について報告する。

3. ハイブリッド型流体式制振装置特性の定式化および制御方式

2.2で述べたとおり、ハイブリッド型流体式制振装置の制御は、周期調整装置のフラップ軸に直結されたACサーボモータの回転角度を制御することによって行われるが、その制御ゲインを算出するためには、ハイブリッド型流体式制振装置の特性を定式化する必要がある。ここでは、その定式化について説明する。

3.1 パッシブ型流体式制振装置特性の定式化

ここでは、まずパッシブ型流体式制振装置特性の定式化について説明する。

まず、制振対象構造物の制振対象モードの運動方程式を以下のように1質点系で表す。

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{y} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

- m_s : 構造物質量
- c_s : 構造物減衰係数
- k_s : 構造物剛性
- x_s : 構造物変位
- \ddot{y} : 地動入力加速度

次に、パッシブ型流体式制振装置の運動方程式についてであるが、参考文献1), 3)では、流体式制振装置水槽本体の水の水平部変位 x_h 、周期調整装置の水の上下変位 x_r を用いて2自由度系で次式のように定式化を行っていた。

$$\begin{bmatrix} m_m & 0 \\ 0 & m_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_h \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_m & -c_{mr} \\ -c_{mr} & c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_h \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_m & -k_{mr} \\ -k_{mr} & k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_h \\ x_r \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_h \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $m_m, m_r, c_m, c_r, c_{mr}, k_m, k_r, k_{mr}$ の詳細については、ここでは記述しないので、参考文献1), 3)参照のこと。また、 m_h は水槽本体水平部有効水量であり、 \ddot{y} は制振装置への入力加速度で、構造物との連成系では構造物の絶対加速度となる。

今回、ハイブリッド型流体式制振装置特性の定式化に当たり、流体式制振装置においてセンサーで検出できる状態量が水槽本体立上り部水位 x_z 、周期調整装置フラップ軸回転角度 θ であるため、式(2)の変数 x_h, x_r を変換して、 x_z, θ を変数とする式に書き直す必要がある。この変換は以下の式により、容易に与えられる。

$$x_h = \frac{A_z}{A_h} x_z = \alpha x_z : (\text{連続の式より}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$x_r = \frac{\pi}{180} \frac{r}{2} \theta = \beta \theta : (\text{フラップ回転角度と水変位の関係より})$$

ここで、

- A_h : 水槽本体水平部断面積
- A_z : 水槽本体立上り部断面積
- r : 周期調整装置U字管半径

式(3)により、式(2)を変数変換すると、以下の式となる。

$$\begin{bmatrix} \alpha m_m & 0 \\ 0 & \beta m_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_z \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha c_m & -\beta c_{mr} \\ -\alpha c_{mr} & \beta c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_z \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha k_m & -\beta k_{mr} \\ -\alpha k_{mr} & \beta k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_z \\ \theta \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_h \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

流体式制振装置の運動方程式(4)と構造物の運動方程式(1)より、パッシブ型流体式制振装置—構造系の運動方程式が次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} m_s + m_h & \alpha m_h & 0 \\ m_h & \alpha m_m & 0 \\ 0 & 0 & \beta m_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_z \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 \\ 0 & \alpha c_m & -\beta c_{mr} \\ 0 & -\alpha c_{mr} & \beta c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_z \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & \alpha k_m & -\beta k_{mr} \\ 0 & -\alpha k_{mr} & \beta k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_z \\ \theta \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_s + m_h \\ m_h \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad \dots\dots\dots(5)$$

3.2 ハイブリッド型流体式制振装置特性の定式化

周期調整装置のフラップ軸にACサーボモータを直結し、ハイブリッド化した場合、(5)式においてフラップ回転角度 θ は自由度を失い、第3行目の式は意味がなくなる。すなわち、次式のような運動方程式になる。

$$\begin{bmatrix} m_s + m_h & \alpha m_h \\ m_h & \alpha m_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & \alpha c_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & \alpha k_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_z \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_s + m_h \\ m_h \end{bmatrix} \ddot{y} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta k_{mr} & \beta c_{mr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

また、ACサーボモータ回転角度 θ においては、角度指令値 u_0 に対して、Fig. 3に示すような特性を持ち、式で表すと次式のようなになる。

$$\ddot{\theta} + 2h_0 \omega_0 \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = \omega_0^2 u_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

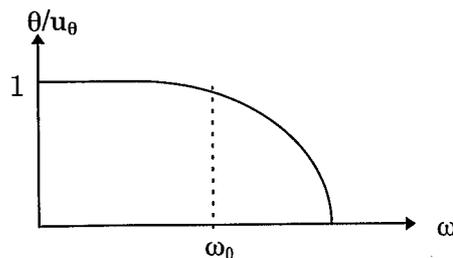


Fig. 3 角度制御の応答特性
Frequency Characteristic of Angle Control

ただし、 ω_0, h_0 は角度指令値 u_θ に対するフラップ回転角度 θ の特性を表す係数である。

ここで、今回の実験では、高次振動の発進を防ぐため、角度司令値出力を6Hzに遮断周波数をもつローパスフィルタに通した。したがって、式(7)で表される角度司令値に対するACサーボモータの回転角 θ の応答特性としては、このフィルタ特性を含んだものとしている。

このように、フラップ回転角度 θ (=ACサーボモータ回転角度) の特性を表す式(7)を式(6)に導入することにより、ハイブリッド型流体式制振装置—構造系の運動方程式は、次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} m_s + m_h & \alpha m_h & 0 \\ m_h & \alpha m_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_z \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 \\ 0 & \alpha c_m & -\beta c_{mr} \\ 0 & 0 & 2h_0\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_z \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & \alpha k_m & -\beta k_{mr} \\ 0 & 0 & \omega_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_z \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_s + m_h \\ m_h \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix} u_\theta \quad \dots\dots (8)$$

3.3 ハイブリッド型流体式制振装置の制御方式

ハイブリッド型流体式制振装置の制御を行うに当たり、(8)式を $X = [x_s \ x_z \ \theta \ \dot{x}_s \ \dot{x}_z \ \dot{\theta}]^T$ を状態量とする状態方程式に直すと次式となる。

$$\dot{X} = AX + D\ddot{y} + Bu_\theta \quad \dots\dots (9)$$

ここで、ACサーボモータ回転角度指令値には、状態量のフィードバックを用いる。すなわち、式で表すと次式となる。

$$u_\theta = -GX \quad \dots\dots (10)$$

ただし、フィードバックゲインGについては、最適レギュレータ理論に基づき、次の評価関数Jを最小とするように決定した。(Q, rは重み関数)

$$J = \int (X^T Q X + u_\theta^T r u_\theta) dt \quad \dots\dots (11)$$

4. 制振効果確認試験および解析による検証

4.1 試験体概要

Fig. 4に示すように、重量4.8tfの1層鉄骨フレームを積層ゴム4個で支持した構造物モデル上に、ハイブリッド型流体式制振装置を設置したものを試験体とする。試験体の総重量は、流体式制振装置(重量1.2tf、水重量を含む)を含めて6.0tf、固有振動数1.17Hz、減衰定数5%である。

流体式制振装置の水有効重量は0.12tfで、試験体全重量6.0tfに対して重量比2%であり、パッシブ状態で試験体の固有振動数に同調させている。

試験体の諸元を以下のTable 1にまとめる。また、試験体の外観をPhoto 1に示す。

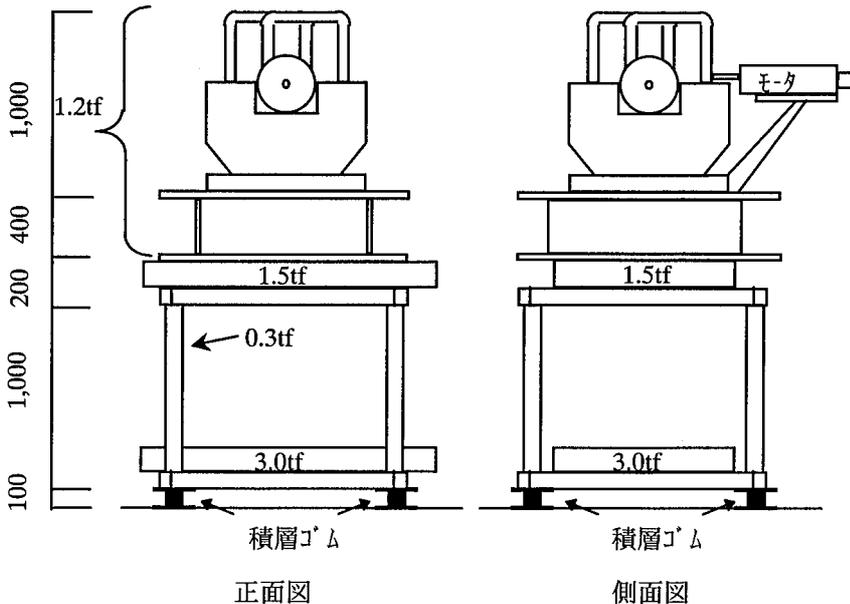


Fig. 4 試験体概要図
Schematic of Experimental Model

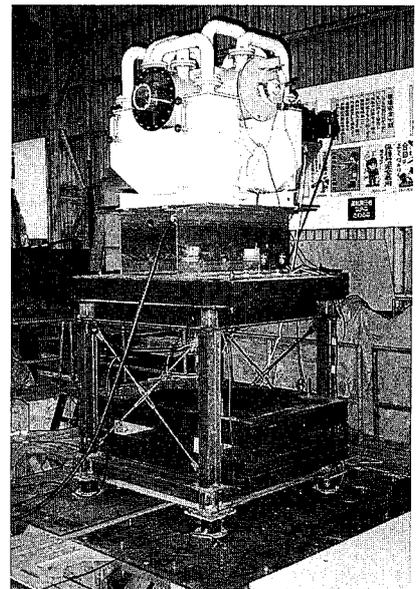


Photo 1 試験体外観
Appearance of Experimental Model

4.2 地動入力に対する伝達特性

試験体を振動台上に設置し、振動台を試験体の共振振動数付近の振動数 (0.5~1.8Hz) で正弦波ステップ加振をすることによって、地動入力に対する試験体の伝達特性を調査した。

4.2.1 振動台入力に対する試験体の伝達特性 Fig. 5 に振動台入力に対する試験体応答の伝達特性を解析結果とあわせて示す。また、各ケースの共振時の応答倍率、応答倍率より求めた減衰定数および非制振に対する応答低減率をTable 2にまとめる。今回の試験体は、固有振動数約1.2Hzを実現するために積層ゴム支持されており、非制振の状態でも5%近くの減衰が得られているため、さらに制振効果をあげるには厳しい条件となっているが、それでもパッシブで約2/3、ハイブリッドでさらにその約1/2の応答低減率が得られ、ほぼ解析どおりの性能であることが確認された。

4.2.2 振動台入力に対する流体式制振装置水位の応答

Fig. 6に振動台入力に対する流体式制振装置水位の応答を解析結果とあわせて示す。実験結果は解析結果とほぼ一致しており、パッシブに比較してハイブリッドでは水の応答が大きくなっていることがわかる。

なお、1.5Hz付近で共振点らしき応答が実験値において見られるが、これは流体式制振装置水槽本体立上り部のスロッシング振動の影響であると思われる。

4.3 自由振動応答

Fig. 7に試験体を人が押したときの自由振動応答時刻

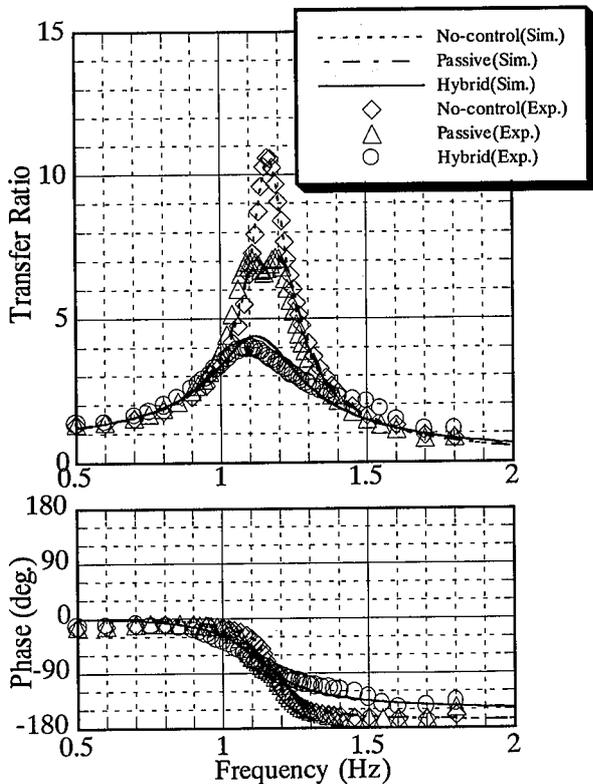


Fig. 5 地動入力に対する試験体の応答 Transfer Function of the Model

歴波形を、非制振、パッシブ、ハイブリッドのそれぞれについて示す。各ケースにおける押す力は、試験体応答加速度の最大値が同じ (25gal) になるように調整した。同図には、実験結果とともに、解析による結果もあわせて示している。解析結果としては、試験体応答加速度の最大値が実験の場合と同じ (25gal) になるように、試験体をインパルス加振したときの応答を用いた。実験値は解析結果とおおむねよく一致している。

ここで、試験体変位の自由振動応答波形より求めた各ケースの減衰定数および非制振に対する応答低減率をTable 3にまとめる。

Table 1 試験体諸元 Model Parameters

試験体	重量	6tf
	固有振動数	1.17Hz
	減衰定数	h=5%
制振装置	水有効重量	0.12tf

Table 2 地動入力に対する応答倍率 (実験値) Transfer Ratio to Input Ground Motion

	非制振	パッシブ	ハイブリッド
応答倍率	10.6	7.1	4.0
減衰定数	4.7%	7.0%	12.5%
低減率	-	0.67	0.38

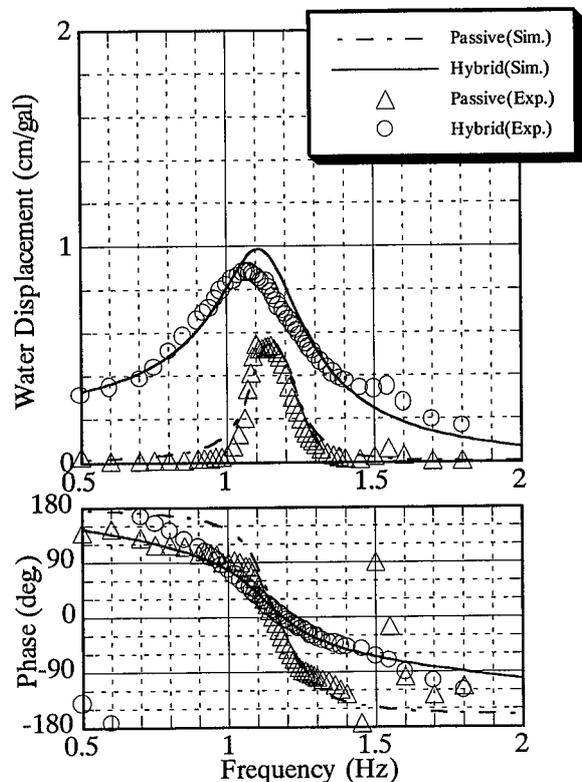


Fig. 6 地動入力に対する水位の応答 Transfer Function of the Water Displacement

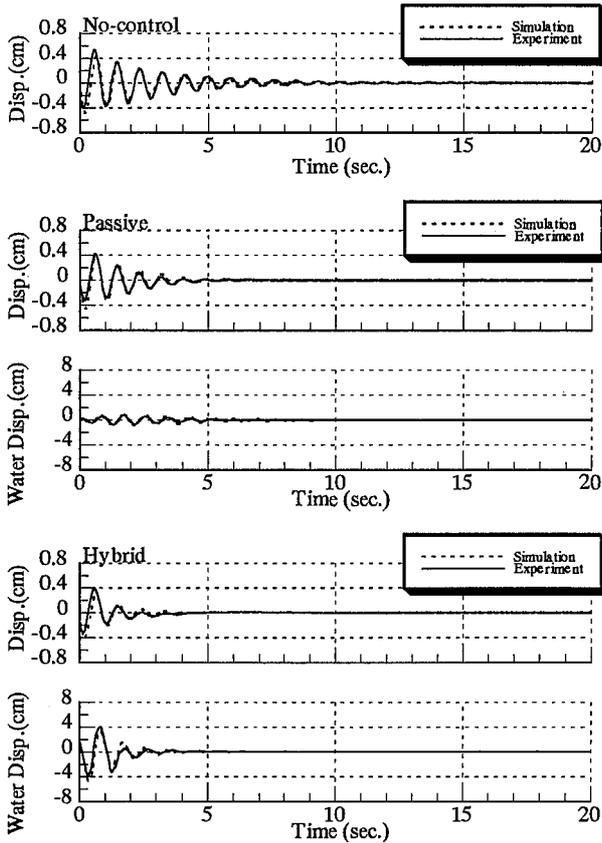


Fig. 7 自由振動応答
Free Vibration Response

Table 3 自由振動応答による減衰定数 (実験値)
Damping Ratio of Free Vibration Response Test

	非制振	パッシブ	ハイブリッド
減衰定数	5.2%	8.4%	16.3%
低減率	—	0.62	0.32

これより、振動台正弦波加振による試験体伝達特性の結果とほぼ同様に、パッシブで約2/3、ハイブリッドでさらにその約1/2の応答低減率が得られ、ほぼ解析どおりの性能であることが確認された。

4.4 地震波入力に対する応答

Fig. 8に振動台に地震波を入力したときの時刻歴応答波形を示す。地震波としては、EL CENTRO1940NSを用い、入力レベルは25galとした。同図には、実験結果とあわせて解析結果も示しているが、両者はおおむねよく一致しており、地震波入力に対しても、最大値の低減、後揺れの抑制にハイブリッド制御の効果が確認された。

5. まとめ

ハイブリッド型流体式制振装置を構造物モデルに搭載

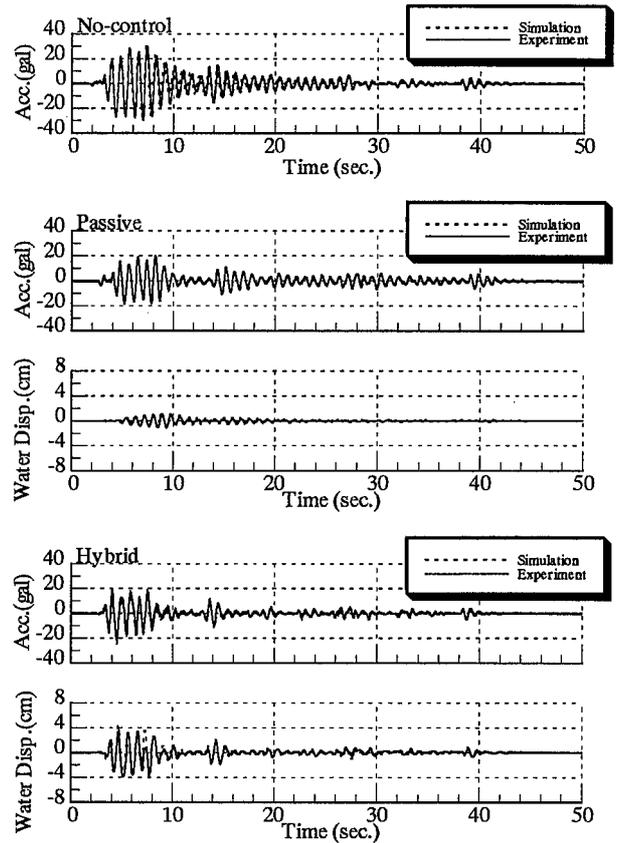


Fig. 8 地震波入力に対する応答
Time Response under Earthquake Oscillation

し、その制振効果を確認する振動試験を行った結果、非制振に対して約3倍、パッシブに対して約2倍の制振効果を得られることが確認できた。また、実験結果を解析によって検証したところ、実験結果と解析結果はおおむねよく一致し、予測どおりの制振性能が得られた。

謝辞

本研究開発は、三菱重工業（株）との共同研究によるものであり、関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 寺村, 他: 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, p. 1~8, (1995)
- 2) 寺村, 他: 凹型水槽式制振装置の開発研究(その9) (その10), 建築学会大会梗概集, B-2, p. 745~748, (1995)
- 3) A.TERAMURA et.al.: Development of Vibration Control System Using U-Shaped Water Tank, Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1343, (1996)