

構造物への入力地震動を考慮した最適震動制御

佐藤 忠信・土岐 憲三・望月 俊宏

OPTIMAL CONTROL OF STRUCTURAL SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT INPUT SEISMIC MOTION

By *Tadanobu SATO, Kenzo TOKI and Toshihiro MOCHIZUKI*

Synopsis

A closed-open-loop optimal control algorithm which was developed by one of authors is applied to the vibration control system using a tuned mass damper (TMD). We investigated the control efficiency affected by two weighting parameters included in the quadratic terms of response vector and control force and one weighting parameter expressing the effect of input motion to the structure. Designing a proper observer we achieved a feasible control system even for the case that the full observation condition is not satisfied. A series of numerical simulation is worked out to demonstrate the control efficiency of the proposed algorithm.

1. はじめに

構造物の震動応答を制御して、地震に耐えようとする試みは数多く考察されてきているが、この十数年、研究の蓄積と実施例の実績が多くなってきた制御技術には、建造物内に粘弾性ダンパーや、動吸振器を設置して構造物の震動応答エネルギーを吸収しようとするものが挙げられる。また、実構造物の設計に取り入れられるようになったものに、積層ゴムを構造物の基礎に設置して建造物への入力地震エネルギーを減少させる免震機構がある。これらに共通の設計思想は、入力地震動のエネルギーを受動的に制御して構造物の震動応答を減少しようとするものである。しかし、大地震などの外乱の場合、これらの受動的な制震手法だけでは構造物の応答を安全なレベルに制御することが困難な場合が生じると考えられ、最近では、より積極的に揺れを制御する能動的な考え方を取り入れた制御方法が研究されるようになってきた。

この能動的な制震思想を実現するために土木分野に導入されたのが、機械、航空機の分野で発展してきた最適制御理論である。用いられる最適制御則の多くは、最適レギュレータ問題を適用したものであり制御量を決定する方程式は二点境界値問題を構成する。この二点境界値問題¹⁾²⁾では、境界条件が、始端と終端に分かれて存在するため、入力情報が全て既知となっていないと終端条件を満たす解を求めることが出来ない。土木構造物を対象にする場合、入力は地震のように非定常である場合が多いので、前もって全入力を知ることは不可能なことが多いので、入力を無視した解を用いることが多かった。そこで Yang 等³⁾⁴⁾は、時間依存型の評価関数を用いることで、二点境界値問題を解かずに当該時刻までの情報のみで最適制御を行う手法を定式化した。

本研究では、まず同調質量付加方式 (TMD: Tuned Mass Damper) を用いた受動的な震動制御器の制震効果について検討を加える。次に、Yang の時間依存型評価関数に入力地震エネルギーの効果を加えた評価関数を定義した上で新しい最適制御則を構築し、受動的な手法と組み合わせることにより、震動制御

効果がどの程度向上するかについての考察を行う。さらに、オブザーバを利用した最適制御アルゴリズムを構築し、その制御特性について考察を加える。

2. 同調質量ダンパーを利用した構造物の最適制御

構造物に小さな振動体を付加して、その固有振動数を構造物の固有振動数と一致させると、振動体(TMD)は構造物より遥かに大きな振幅で振動し、その結果として構造物の震動エネルギーが吸収され震動応答が制御される。同調質量付加方式は、この原理を利用したもので、振動体を同調質量ダンパーと呼ぶ。この同調質量ダンパーの諸量を決定する際に重要なのが、その質量、減衰定数、および固有振動数である。以下では、これらの値を決定するとともに、その制御効果について検討を加える。なお、これらの値を適切に決定する過程をチューニングと呼ぶ。

2.1 解析モデル

解析の対象とした振動系は8階の建物であり、Fig. 1に示すようにその最上階に同調質量ダンパーを設置し、9自由度9質点系の集中質点系にモデル化した。主構造物(同調質量ダンパーを除く構造物本体)の各層は等質量とし剛性も各層間すべて等しいものとする。また、主構造物の減衰定数は0.01とした。この時の1次から8次までの固有振動数は、それぞれ1.03 Hz, 3.06 Hz, 4.99 Hz, 6.74 Hz, 8.27 Hz, 9.52 Hz, 10.44 Hz, 11.00 Hzである。また、入力地震動としては1940年のEl Centro記録のNS成分を、最大加速度を100 galに調整したものをを用いた。このモデルの諸元をTable 1に示す。

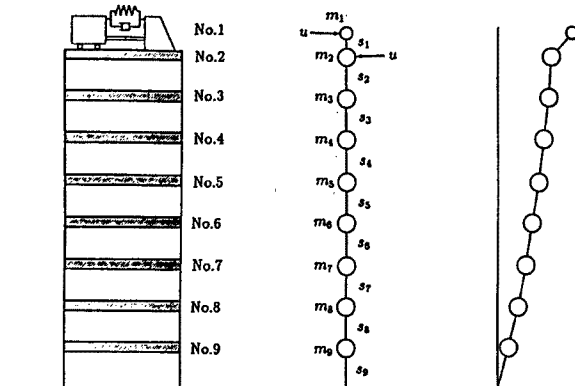


Fig. 1. Model of structural system.

2.2 同調質量ダンパーの最適化に関する考察

同調質量ダンパーの諸量としては、その質量、減衰定数、ばね定数がある。これらを決定するために、同調質量ダンパーが剛な基礎に支持されている場合の固有振動数を主構造物の1次固有振動数に一致させ、質量比(ダンパーの質量/主構造物の総質量)と減衰定数比(ダンパーの減衰定数/主構造物の減衰定数)に関するパラメータ解析を行ってダンパー諸量の最適値を決定する。

Fig. 2は、減衰定数比を1.0, 3.0, 5.0, 8.0, 10.0, 20.0と変えた場合の質量比と最上階(質点2)の周波数応答関数の最大値との関係を示している。減衰定数比が10.0ぐらいまでは、質量が増加するに従い極小値を有する最適値

Table 1. Structural properties of a linear model

No.	Mass (ton)	Stiffness (tonf/cm)
1	0.00102	0.04298
2	0.01270	15.783
3	0.01270	15.783
4	0.01270	15.783
5	0.01270	15.783
6	0.01270	15.783
7	0.01270	15.783
8	0.01270	15.783
9	0.01270	15.783

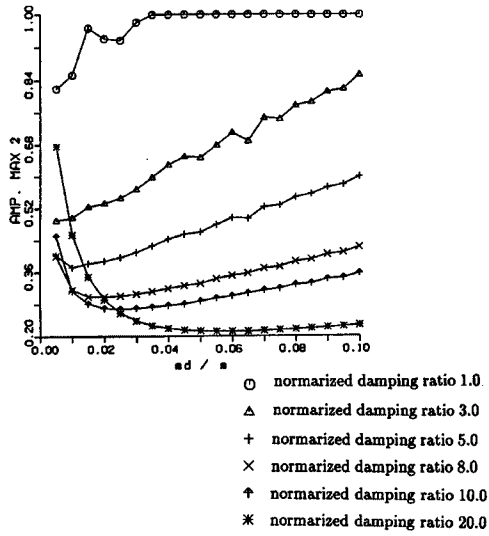


Fig. 2. Relation between mass ratio and maximum value of response function of the top floor.

り、それ以上の大きな減衰定数を用いても応答値にほとんど差は見られないこと、制御の手段としてダンパーの粘性を利用するのが目的ではないので、できるだけダンパーの粘性は小さいほうが望ましいことなどから、減衰定数比を 5.0 と決定した。

量比が存在している。これは、質量比を大きくすると制御効果が悪くなる場合のあることを示しており、減衰定数と質量の最適な組合せがあることを示唆している。次に、実際に地震動を入力させたときの構造物各層の時刻歴応答値から検討する。Fig. 3 は、El Centro, 八戸の地震波をそれぞれ入力した時の最上階の最大応答変位を、同調質量ダンパーのない場合の応答変位の最大値で正規化して表した図である。減衰定数比を 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 と変えても、質量比が約 0.01 の近傍で極小値をとるのがわかる。ダンパーの質量はなるべく小さいほうが機構的には取り扱いが便利であるので比較的良好な制御効果があると考えられる質量比として 0.01 を設定し減衰定数比を決定する。Fig. 4 は、質量比 0.01 の場合に対し減衰定数比が震動制御効果に与える影響を示したものである。応答値が減衰定数比の増加に伴い単調に減少していくため最適な減衰定数を決定することは困難であるが、応答値の減少の程度が減衰定数比 5.0 あたりから低減しており、

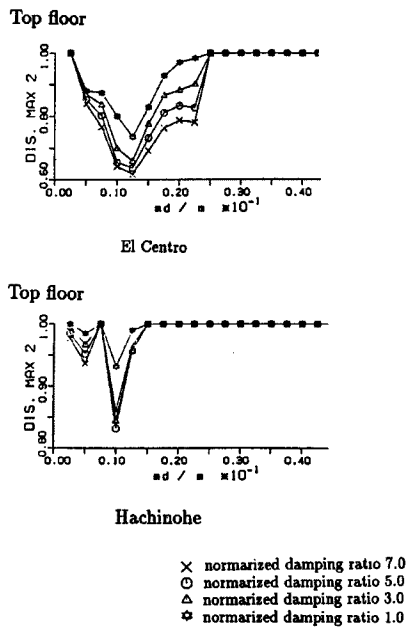


Fig. 3. Relation between maximum response of the top floor and mass ratio.

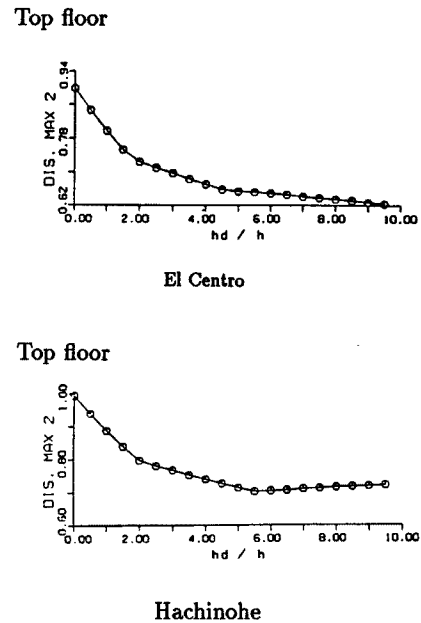


Fig. 4. Relation between maximum response of the top floor and normalized damping ratio.

2.3 解析結果

Fig. 5は、構造物にEl Centro記録を入力した時の最上階の応答変位を示す。図中、上部から順に、ダンパーを設置しない場合、チューニング前のダンパー（質量比0.01，減衰定数比1.0）を設置した場合、チューニングを施したダンパー（質量比0.01，減衰定数比5.0）を設置した場合の応答変位である。同調質量ダンパーを設置することによって応答変位に減少が見られる。また、チューニングを施した場合とそうでない場合を比べると、チューニングを施していない場合、後半になって応答値に増加傾向がみられるのが、チューニングを施すことで、その傾向が抑えられ最大変位は元の約6割に減少しており、適切なダンパーを付加すれば震動制御効果のあることがわかる。

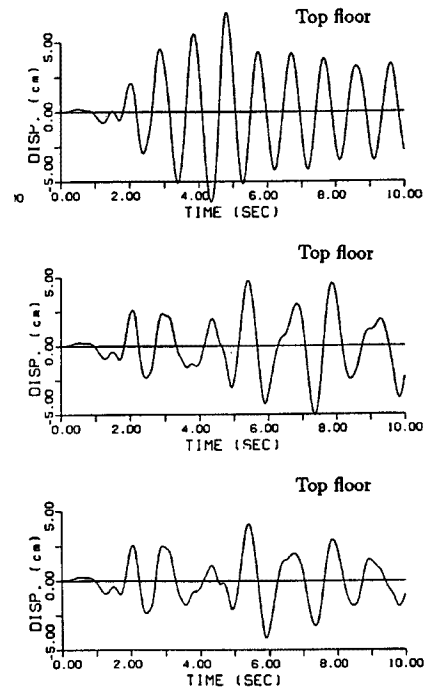


Fig. 5. Time history of the top floor relative displacement. (Top: without any mass damper, Middle: basic mass damper, Bottom: tuned mass damper)

3. 制御則を適用した構造物の最適制御

時間依存型評価関数を基にした最適制御則を構築し、可動質量系を震動制御機構として用いる可能性について検討を加える。解析モデルとしては、Fig. 1のモデルを用い、その制御効果を調べる。

3.1 評価関数の提案と最適制御則の定式化

構造物の運動方程式は、一般的に次式で表される。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -m\ddot{X}_0(t) + Hu(t) \tag{1}$$

M, K, C は、それぞれ質量マトリクス、剛性マトリクス、減衰マトリクスを表し、系が n 質点なら($n \times n$)次元の正方マトリクスである。また、 H は制御力の作用位置を表すマトリクスで、制御力の作用点数を p とすると、($n \times p$)次元となる。 \ddot{X}_0 は、入力地震加速度を表し、質点の質量を表す n 次元ベクトルである。

式(1)を状態方程式に書き直すと次式となる。

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + W_1\ddot{X}_0(t) \tag{2}$$

ここに、

$$z(t) = [x(t), \dot{x}(t)]^T \tag{3}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix} \quad W_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}m \end{bmatrix} \tag{4}$$

入力及び制御力が積分時間間隔内で、線形に変化すると仮定して式(2)を解くと次式を得る。

$$z(t) = TD(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + W_1\ddot{X}_0(t)] \tag{5}$$

ただし、

$$D(t-\Delta t) = e^{\theta \Delta t} T^{-1} \left\{ z(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t-\Delta t) + W_1\ddot{X}_0(t-\Delta t)] \right\} \tag{6}$$

合理的な制御力を求めるためには、最適性を保障するために評価関数を設定する必要がある。ここでは、Yang 等³⁾⁴⁾の提案した時間依存型評価関数に構造物に入力される地震エネルギー量を加えた次のような評価関数を提案する。

$$J(t) = \dot{z}^T(t) \tilde{Q} \dot{z}(t) + u^T(t) R u(t) + \alpha \left\{ - \int_0^t \dot{x}^T(\tau) \tilde{m} \ddot{X}_0(\tau) d\tau \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 α は、評価関数中の入力地震エネルギー量に対する重みである。 z は、ダンパーの状態量 (x_1, \dot{x}_1) を除いた $2(n-1)$ 次元ベクトル、重み \tilde{Q} は $2(n-1) \times 2(n-1)$ 次元の行列、 R は同調質量ダンパーが1台設置されるのみであるためスカラー量、 \dot{x} は同調質量ダンパーを除いた $n-1$ 次元速度ベクトル、 \tilde{m} は同調質量ダンパーを除いた $n-1$ 次元質量ベクトルである。評価関数中にダンパーの状態量を考慮しないのは、同調質量ダンパーは震動することによって構造物の地震応答を減少する働きを有するため、ダンパーの状態量に制限を加える必要がないからである。なお、 $z(t)$ に関する状態方程式は、ダンパーを除いた主構造物に関する運動方程式より求められるので、式(2)を参照して次のようになる。

$$\ddot{z}(t) = \tilde{A} \dot{z}(t) + \tilde{B} u(t) + \tilde{W}_1 \ddot{X}_0(t) + W_3(c_1 \dot{x}(t) + k_1 x_1(t)) \dots\dots\dots (8)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\tilde{M}^{-1} \tilde{K} & -\tilde{M}^{-1} \tilde{C} \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{M}^{-1} \tilde{H} \end{bmatrix} \quad \tilde{W}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{M}^{-1} \tilde{m} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ P \\ M \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

式(8)を制約条件式として、ラグランジュの未定係数法を用いて式(7)の評価関数を最小にする制御量を求めると次式が得られる。

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T \tilde{Q} \dot{z}(t) + \alpha \frac{\Delta t}{4} R^{-1} B^T W_2 \ddot{X}_0(t) \dots\dots\dots (11)$$

3.2 解析結果

本節では、Fig. 1 に示す8層構造物モデルに対し、制御則を適用した解析結果を示す。Fig. 6 は、上段から順に制御を行わない場合、TMDを用いた場合、TMD系にフィードバック形(式(11)の $\alpha=0$ に相当)の制御力を作用させた場合の最上階の応答変位を示す。TMDを用いた場合、その応答はダンパーのない場合の応答値の約6~8割減少している。それに比べ制御力を与えた場合、応答値は1/3~1/2と大幅に減少しており、制御力を作用させた場合のほうが、制御効果は大きいことがわかる。次に、入力地震動を評価関数に考慮した場合(閉ループ制御)とそうでない場合(開ループ制御： $\alpha=0$ に相当)を比較する。Fig. 7 は、上段に最上階の応答変位、下段に制御力を示す。左側が開ループ制御、右側が閉ループ制御である。制御力を見ると閉ループ制御の場合、制御力に地動加速度を考慮するため地震波形に含まれる高周波成分が見られる。また、閉ループ制御に比べ制御量は増加しており、その結果最上階の応答変位は減少

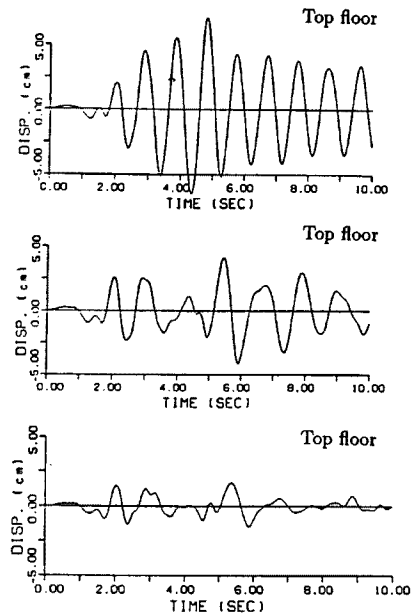


Fig. 6. Time history of the top floor relative displacement. (Top: without control equipment, Middle: with tuned mass damper)

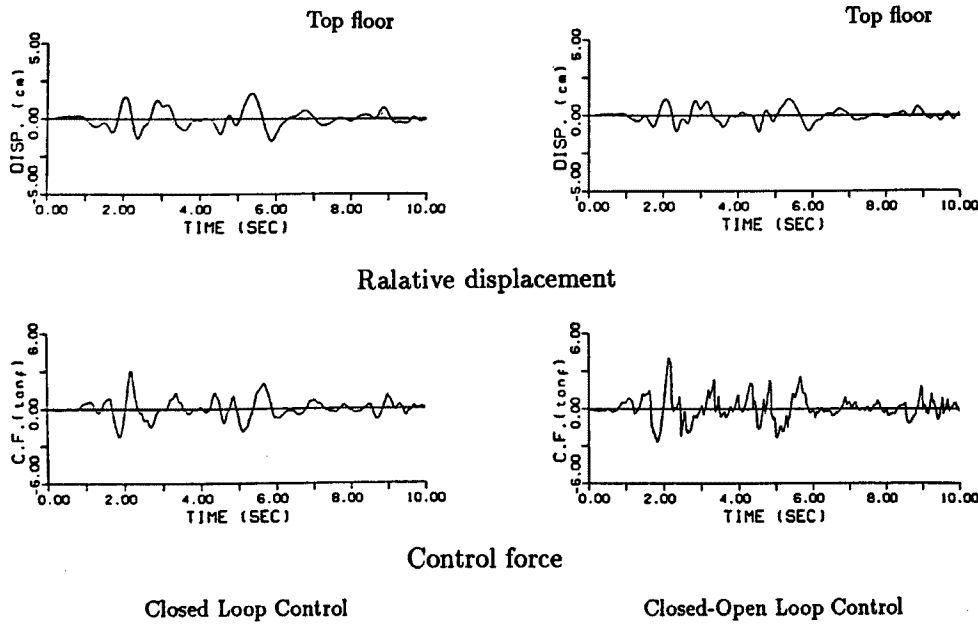


Fig. 7. Comparison between the results obtained by closed-loop control and closed-open-loop control force.

し、評価関数に入力地震動を考慮した効果が見られる。

3.3 評価関数中の重みに関する考察

(a) 重み Q に関する考察

評価関数に含まれる重み Q, R, α は、式(11) から明らかのように、 $\alpha/R, Q/R$ の形で制御量に影響を及ぼす。そこでまず $\alpha=0$ として Q/R と状態量、制御量との関係から、最適な Q を決定する。

Q は、 n 質点系の場合、 $2(n-1) \times 2(n-1)$ の正方行列であり、一般的な最適レギュレータ問題において、「対称かつ非負定値マトリクス」という条件が与えられている。ところで、式(11) において B マトリクスは、その上半分が 0 であるため、 Q を次式のようにおいても、上記の条件に抵触することはない。

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}, \quad Q_{21} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & \dots & q_{n-1} \\ q_2 & & & \\ \vdots & & [0] & \\ q_{n-1} & & & \end{bmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

以下では、問題を簡単にするため $Q_{21}=Q_{22}$ とした。また、 Q_{21} は対称マトリクスなので、 $(n-1)$ 個の成分 $q_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ のみで決定される。そこで、 q_1 を 1000 と固定し、残りを上部 (q_2, q_3)、中部 (q_4, q_5)、下部 (q_6, q_7, q_8) の 3 つに分けて、次表の破線以上の 3 つのケースを考えた。

case	最上部	上部	中部	下部
1	1000	x	x	x
2	1000	x	x	$\frac{1}{2}x$
3	1000	x	$\frac{1}{2}x$	$\frac{1}{2}x$
4	1000	500	250	250

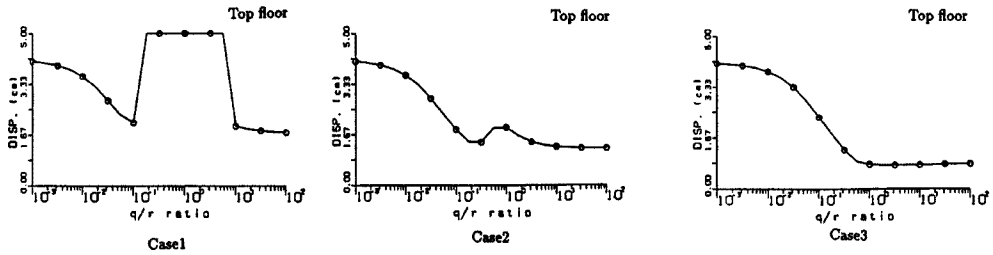


Fig. 8. The effect of Q/R value on the maximum relative displacement of the top floor.

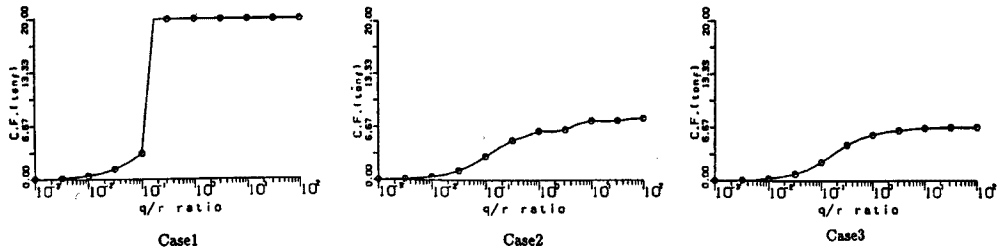


Fig. 9. The effect of Q/R value on the maximum control force.

はじめ x を 1000 に固定し、ケース 1～3 の重みに対して、 Q/R を $10^{-3} \sim 10^2$ まで変化させた時の最上階の最大応答変位を Fig. 8 に、最大制御力を Fig. 9 に示す。図中、左から順にケース 1, 2, 3 の重みを用いた場合の結果を示す。ケース 1 では $Q/R = 10^{-1}$ を境に制御力、応答変位共に増加しており、ケース 2 では $Q/R = 10^{-1} \sim 10^0$ の間で応答変位が一度増加した後減少している。一方、ケース 3 では、最大制御力が 0 から収束値まで最も滑らかに推移し、またそれに伴い最大応答変位も滑らかに減少することから一番制御力に無駄がないと考えられる。これより、ケース 3 の重みが、効率よく構造物の応答を制御するのに適していることがわかる。しかし、下層部においてその最大応答変位は極小値を有し、 Q/R の増加と共に再び増加する傾向がみられるので、この傾向を極力抑えるためにケース 3 の重みのまま x のみを変えて制御特性を調べた。その結果、 x が 500 の場合に最適な制御特性が得られたので、ケース 4 の Q を最適な重みと決定した。

(b) 重み α に関する考察

地動加速度は、 α/R を準ずることにより制御力にフィードフォワードされる。そこで、 α/R を変化させて応答変位、制御力との関係を探る。Fig. 10 は、 $\alpha/R = 100$ の値を 1 とし正規化し、 $R = 1000, 5000, 10000, 100000$ とした場合の結果を示している。 α/R が増加するに従い、最大応答変位は 1.0 から減少し、逆に最大制御力は 1.0 から増加する。また、 R の大きさにより最大応答変位の減少と制御力の増加の割合が異なっている。 R が 10000 の場合を見ると、制御力の増加の割合に対し、最大変位の減少する割合は小さく制御効率は悪い。一方、 R が 5000 の場合には、 α/R の増加に対して制御力の増加がわずかであるが、 α/R が 2000 程度にな

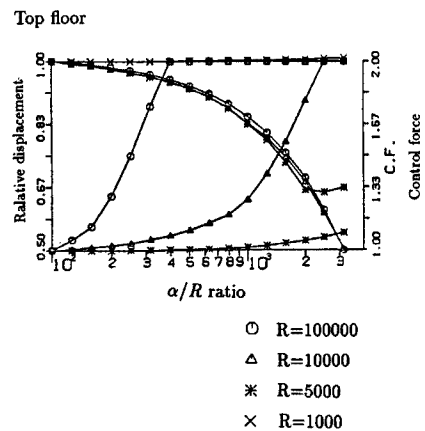


Fig. 10. The effect of α/R value on the maximum relative displacement at the top floor and control force for several R values.

ると、最大変位は4割程度の減少が見られ効率よく制御されているのがわかる。この結果より、 α/R を2000とし R が5000の場合に制御効率が最大になるとして $\alpha = 10000000$ とした。

4. オブザーバを適用した構造物の最適制御

前章までに適用してきた制御則は、構造物の応答変位、応答速度が全て既知であるという条件に基づいている。しかし、一般に全ての情報を観測することは不可能であることが多く、状態量をフィードバックして制御するためには、制御入力信号と限定された測定出力信号のみから状態変数を推定する必要が生じる。この目的のために、状態推定器としてLuenburger⁵⁾⁶⁾はオブザーバを、Kalman¹⁰⁾はカルマンフィルタを提案した。オブザーバには、同一次元オブザーバと最小次元オブザーバがあるが、本研究では、同一次元オブザーバを用いて、状態変数である各質点の相対変位・速度の推定を行った。

4.1 オブザーバを利用したレギュレータ問題の定式化

本研究で用いる制御系は次式で表される。

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + W_1 \dot{X}_0(t) \cdots \cdots \cdots (13) \\ y(t) = Cz(t) \cdots \cdots \cdots (14) \end{cases}$$

ここに、状態変数を n 次、測定出力を1次とすると C は $(n \times 1)$ のマトリクスで、状態変数 n 個のうちどの要素が測定されるかを定める。この場合、オブザーバは、 \hat{z} が推定値を表すとして次式で表される。

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = (A - KC)\hat{z}(t) + Ky(t) + Bu(t) + W_1 \dot{X}_0(t) \cdots \cdots \cdots (15) \\ y(t) = C\hat{z}(t) \cdots \cdots \cdots (16) \end{cases}$$

この時、状態変数の誤差ベクトルを $e(t) = \hat{z}(t) - z(t)$ とおくと、式(13), (14), (15)から

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \cdots \cdots \cdots (17)$$

となることから、 K マトリクスを操作し、 $(A - KC)$ を安定行列にすることで $\hat{z}(t)$ を $z(t)$ の漸近的推定値として使える。今、式(15)を積分すると次式を得る。

$$\hat{z}(t) = \hat{T}D(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + W_1 \dot{X}_0(t) + W_3(k_1 x_1 + c_1 \dot{x}_1) + Ky(t)] \cdots \cdots \cdots (18)$$

ここに、

$$D(t - \Delta t) = e^{\theta \Delta t} \hat{T}^{-1} \left\{ z(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t - \Delta t) + W_1 \dot{X}_0(t - \Delta t) + W_3(k_1 x_1(t - \Delta t) + c_1 \dot{x}_1(t - \Delta t)) + Ky(t - \Delta t)] \right\} \cdots \cdots \cdots (19)$$

式(18)で与えられる $\hat{z}(t)$ を式(11)における $\hat{z}(t)$ の推定値とすれば、制御力は次式のように与えられる。

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T Q \hat{z}(t) + \alpha \frac{\Delta t}{4} R^{-1} B^T W_2 \dot{X}_0(t) \cdots \cdots \cdots (20)$$

式(20)は、推定値を用いたレギュレータ問題の解となっている。

4.2 解析結果

まず、オブザーバを用いて状態量を推定した結果を検討する。観測値はFig. 1において質点1, 2, 6の3点で得られるものとし、各質点の応答速度のみが観測できるものとする。Fig. 11は、非制御時にオブザーバを用いて推定された観測点(最上階)と非観測点(質点4)の応答変位を示す。図中、太線が真値の応答を、細線がオブザーバより推定された応答を示す。速度の観測されている質点は真値とほぼ同じ値を再現している。また未観測点の応答値も、あまり大きな誤差はなく再現されており、オブザーバが有

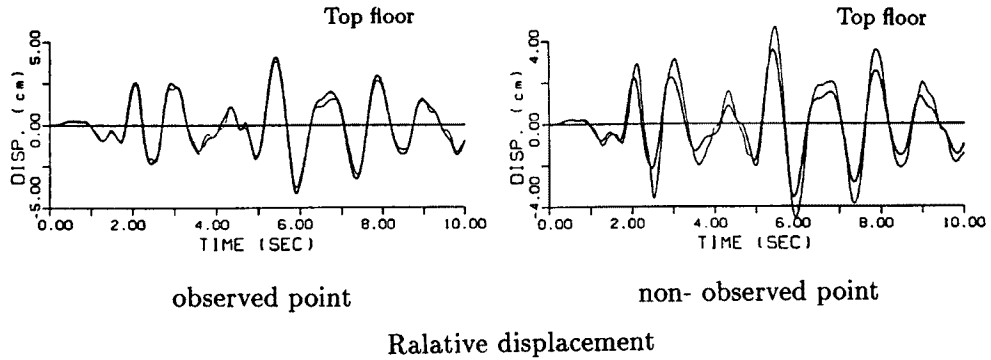


Fig. 11. Time history of relative displacement calculated by using the observer for the case of without control. (points of relative velocity observations : top, third and fifth floors)

効に働いている事がわかる。さらに、オブザーバを用いて推定した状態量を用いて制御を行った場合を考える。Fig. 12 は、先ほどと同様、3 質点について応答速度のみを観測した場合の最上階の応答変位、制御力を示す。これより、どちらもそれほど大きな誤差なく再現されている事がわかる。

次に、オブザーバの有効性について検討を加える。式(11) が示すように、制御量は重み Q を介して状態量がフィードバックされることにより決定される。そこで未知の状態量が存在する場合、それらに相当する重み Q の要素を 0 にする事で、オブザーバを用いずとも観測値のみを用いて制御力を与えることが可能である。Fig. 13 は、オブザーバを利用せず、重み Q を変えた場合の最上階の応答変位、制御力を表

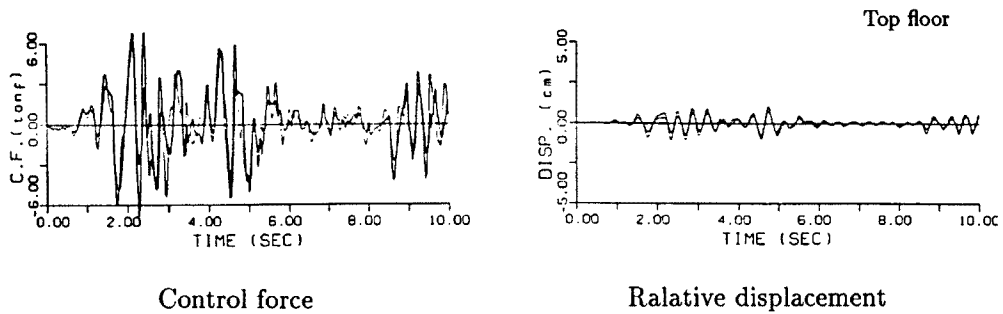


Fig. 12. Time history of control force and relative displacement for the case with control.

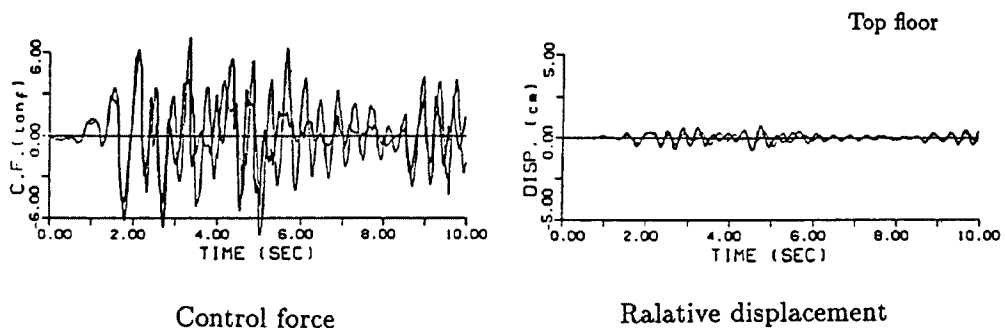


Fig. 13. Time history of control force and relative displacement.

す。Qは、質点1, 2, 6の3点の応答速度のみが制御量にフィードバックされるように調節した。Fig. 12と比較するとわかるように、応答変位、制御量とも誤差が大きいことがわかる。従って、オブザーバを利用したほうが再現誤差を少なくできることが判明する。

5. 結 論

本研究では、地震等の非定常な外力に対して土木構造物の震動を最適に制御するために、まず受動的な制震手法の一つとして、同調質量付加方式を用いた震動制御効果を検討し最適な付加質量を求めた。次に、能動的な手法として時間依存型評価関数を用いた最適制御則を提案し、その制御則の適用性について検討を加えた。また、オブザーバを利用して構造物の未知の状態量の再現を行い、その推定値を用いた最適制御則を構築した。

本研究で得られた成果を以下に述べる。

- (1) 8層構造物の最上階に同調質量ダンパーを設置した場合を考え、周波数特性と時刻歴応答の両者を用いて検討した結果、同調質量ダンパーに対し最適な質量比と減衰定数比が存在することがわかった。
- (2) 構造物に入力される地震エネルギー量を考慮した評価関数を用いて最適制御則を定式化した。得られた制御則を用いてモデル構造物の制御を行った結果、同調質量ダンパーのみを設置した場合に比べて大きな制御効果があることがわかった。
- (3) 本研究で用いた評価関数には、一般的レギュレータ問題で用いられている重み Q, R 以外に入力地震エネルギーを考慮するための重み α がある。制御力はこれら3つのパラメーターに大きく依存しているのでそれらの値を適切に選択する必要のあることを明らかにした。
- (4) 同一次元オブザーバを用いて未知の状態量を推定した結果、観測点を減らしても、適当な重みを選ぶことで充分な制御効果が得られた。

参 考 文 献

- 1) 加藤寛一郎：最適制御入門，東京大学出版社，1987.
- 2) 辻岡邦夫：最適制御理論，産業図書，1977.
- 3) Yang, J.N., M. ASCE., A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Journal of Engineering mechanics Division ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1369-1387, Sep. 1987.
- 4) Yang, J.N. and Akbarpour: Practical Considerations for Structural Control. System Uncertainty, System time Delay and Truncation of Small Control Forces, National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), Technical Report Nceer-87-0018, Aug. 1987.
- 5) 小郷 寛, 美多 勉：システム制御理論，実務出版，1989, pp. 114-139.
- 6) 久村富持：制御システム論の基礎，共立出版，1988, pp. 91-202.
- 7) 佐藤忠信，土岐憲三，橋本雅道：構造物の震動制御における作用時間遅れに関する研究，土木学会論文集，No. 428 / I-15, 1991, pp. 193-202.
- 8) 土肥 博，赤木久真，富田真一，置田 仁，中村喜久雄，奥田賢持：建物上トラス鉄塔の地震時振動制御に関する研究，Proceedings of the Eighth Japan Earthquake engineering symposium, vol. 2, 1990, pp. 1791-1796.
- 9) 藤波健剛，山本慎男，曾根 彰，宮川敬史：ふりことして機構を利用した動吸振器による構造物の制振，Proceedings of the Eighth Japan Earthquake engineering symposium, vol. 2,

1990, pp. 1839 - 1844.

- 10) 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉出版，1983.
- 11) Tadanobu Sato, Kenzo Toki and Kazuhisa Sugiyama: Optimal Control of Seismic Response of Structures, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 7, No. 1, 1990, pp. 179 - 188.