

構造物への入力地震動を考慮した最適震動制御

京大防災研究所 正 員 佐藤忠信
 京大防災研究所 正 員 土岐憲三
 京都大学大学院 学生員 ○望月俊宏

1.はじめに 同調質量ダンパーを用いて地震等の不規則外乱に対する構造物の応答を制御するために、評価関数に入力地震動を考慮した制御則を提案し、その効果を検証する。更にオブザーバを用いて制御入力と応答の観測値から状態変数の時間応答の再現を行った。

2.同調質量ダンパーの設定 解析モデルは、図1に示すように8層構造物の最上階に同調質量ダンパーを1台設置した9自由度9質点系の集中質点系モデルを用いた。ダンパーを同調質量ダンパーとする場合、その固有振動数を主構造物の1次固有振動数に一致させる以外に、質量比（ダンパーの質量/主構造物の総質量）、減衰定数比（ダンパーの減衰定数比/主構造物の減衰定数比）を決定する必要がある。図2は、各減衰定数比に対する質点2の最大応答変位と質量比の関係を示した図である。図より、質量比が0.01付近で最大応答変位は最も減少している。また、減衰定数比は大きいほど最大値は減少するが、5.0を

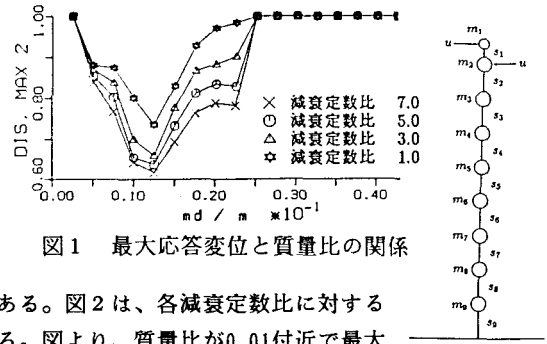


図1 最大応答変位と質量比の関係

図2 モデル
 質点2の最大応答変位と質量比の関係を示した図である。図より、質量比が0.01付近で最大応答変位は最も減少している。また、減衰定数比は大きいほど最大値は減少するが、5.0を越えるとその値に変化があまり見られないこと、ダンパーの減衰定数を必要以上に大きくすることは望ましくないこと、などから同調質量ダンパーとして良い効果の得られた質量比0.01、減衰定数比5.0を用いた。

3.入力地震動を考慮した最適制御則の定式化 Yang¹⁾等による時間依存型評価関数に、構造物への入力エネルギーを考慮した評価関数は次式のように表せる。²⁾

$$J(t) = z^T(t)Qz(t) + u^TRu(t) + \alpha \left\{ - \int_0^t \dot{x}^T(\tau) m \ddot{X}_0(\tau) d\tau \right\} \quad (1)$$

ただし、評価関数に同調質量ダンパーの状態量を考慮する必要がないため、同調質量ダンパーの状態量を除いた状態量を $Z(t)$ とした。また、自由度(n)のモデルの場合、重み Q は $(2(n-1) \times 2(n-1))$ 次元の行列となる。この評価関数を最小とする制御力を構造物に作用させることで最適制御を行う。図3は、質点2の応答変位の時刻歴曲線を示す。上段に制御力を作用させず先ほどの同調質量ダンパーのみで制御した場合、中段に入力地震動を評価関数に考慮しないで制御力を作用させた場合、下段に入力地震動を考慮した制御力を作用させた場合を示す。図より、同調質量ダンパーのみで受動的に制御する場合に比べ積極的に制御力を作用させた方が、応答値は小さく抑えられ制御効果は大きいことがわかる。また、入力地震動を考慮した場合にも応答変位に減少が見られ有効な効果が得られるのがわかる。

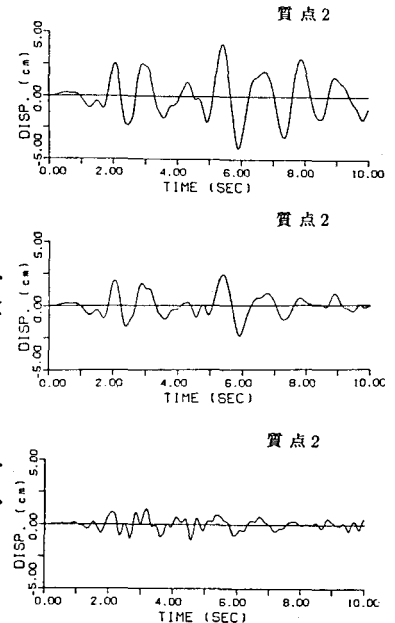


図3 応答変位

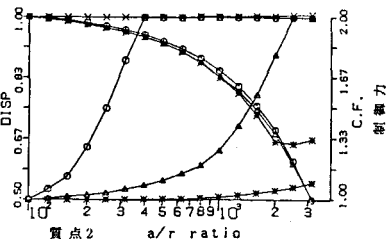
Tadanobu Sato, Kenzo TOKI, Toshihiro MOCHIZUKI

4. 重みの検討 (1)式の評価関数を最小にする制御力は次式に示される。

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

従来の制御力に対し、第2項に入力地震動の影響項が付加されている。 α は、評価関数中での入力エネルギーに対する重み、 Q は状態量に対する重み、 R は制御力に対する重みを示す。制御力は、この3つの重みの影響を受け決定される。図4は、質点2に関し Q

○ $r=100000$
△ $r=10000$
※ $r=5000$
× $r=1000$



を固定した時の α と R を変化させた場合の最大変位、最大制御力の関係を $\alpha/r=100$ の値で正規化して示したグラフである。横軸に α/r を、左側縦軸に最大変位、右側縦軸に最大制御力を示す。グラフより、 α/r が増加するにつれ、最大変位は1から減少し、最大制御力は逆に1から増加する。 r が大きい場合、最大変位の減少率に比べ最大制御力の増加率が大きく制御の効率が悪いのに対し、 $r=5000$ では最大応答変位の減少率の方が最大制御力の増加率より大きく効率の良い制御が行われている。これより、 $r=5000$ 、 $\alpha/r=10^3 \sim 2 \times 10^3$ とした場合、効率の良い制御が行える。

5. オブザーバを適用した最適制御 (2)式に示される制御力は、状態量 $Z(t)$ が全て既知でなければ決定できない。しかし、現実には全ての状態量を入手することは困難であることから、既知の状態量を用いて未知の状態量を推定する必要がある。そこで次式に示すオブザーバ³⁾を用いて未知の状態量を推定する。

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = (A - KC)\hat{z}(t) + Ky(t) + Bu(t) + W_1 \ddot{X}_0(t) \\ y(t) = C\hat{z}(t) \end{cases} \quad (3)$$

また、この式より導いた推定値 $\hat{z}(t)$ を(2)式の $Z(t)$ の代わりに用いて制御力を決定し、オブザーバを用いたレギュレータ問題を定式化した。状態量のうち応答速度が3点(観測点:1, 2, 6)しか観測できない場合を考え、残りの未知の応答値をオブザーバにより推定

し、さらにこの推定値を用いて制御力を決定し制御を行った。図5は制御力を作用させていない場合に対してオブザーバを用いて推定した質点2の応答変位を示す。図は全ての状態量が既知として求めた真値とオブザーバによる推定値を重ねた図であるが、誤差は少なく良く再現されている。ただし、下層部ほど応答値の再現誤差が大きい傾向にあるため、全質点の推定値を用いて制御力を求めると、再現誤差が増加する結果となる。そこで、推定された応答値のうち、再現誤差が少なく正確に推定されている応答値のみから制御力を求めて、制御が可能かどうか検討した。図6に質点2のみの応答値を用いて制御を行った場合の応答変位を示す。これより、応答値は小さく抑えられ制御が可能であることがわかる。

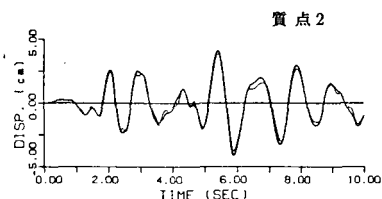


図5 応答変位(非制御時)

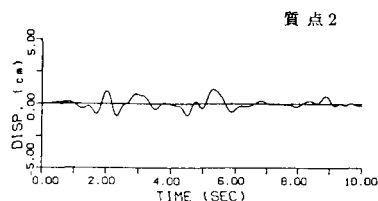


図6 応答変位(制御時)

参考文献 : 1) J. N. Yang, 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. 2) 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, pp. 193-202, 1988 3) 小郷寛, 美多勉 : システム制御理論, 実務出版, pp. 114-139, 1989