土木学会第45回年次学術講演会（平成２年９月）

I-481

震動制御による系の周波数特性の変化に関する研究

京都大学防災研究所　正会員　佐藤　忠信
京都大学防災研究所　正会員　土岐　憲三
京都大学大学院　学生員　橋本　雅道

1. まえがき　地震などの非定常外力に対して構造物の震動を制御するためには、時々刻々得られる情報のみから制御力を決定する必要がある。従来のレギュレータ問題では、入力地震動の性質を十分に考慮した制御を行うことができず、また制御力の時間遅れを考慮した制御則とはなっていなかった。本研究では評価関数に構造物に入力する震動エネルギーを導入し、入力地震動の性質を直接制御力に反映することができる制御則を提案する。また、制御力の作用時間遅れを考慮するため、状態量や入力地震動を予測する方法を提案する。また、制御力が働く場合の系の周波数特性の変化について考察を行う。

2. カルマンフィルタを用いた入力地震動の予測[1]　入力地震動を自己回帰過程で表されるとすれば、観測方程式及び状態方程式は次のように表される。

$$g_t = -\alpha_1 g_{t-1} - \alpha_2 g_{t-2} - \cdots - \alpha_q g_{t-q} + v_t \quad (1) \qquad \hat{\alpha}_{t+1|t} = I\hat{\alpha}_{t|t} \quad (2)$$

時間更新された係数$\hat{\alpha}_{t+1|t}$を用いて次式で時刻$t+1$における予測値が求まる。

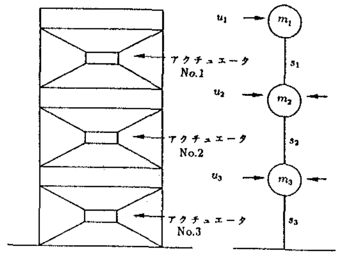
$$\hat{g}_{t+1} = H_t \hat{\alpha}_{t+1|t} \quad (3) \qquad H_t = \{-g_t - g_{t-1} \cdots - g_{t-q+1}\} \quad (4)$$

さらに予測された値を観測マトリクスH_tに導入することによって、時刻$t+1$より未来の入力地震動の予測値を求めることができる。

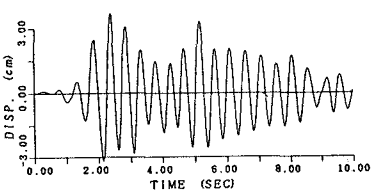
3. 評価関数の提案と最適制御則の定式化　観測される状態量を計算機に入力するのに伴う時間遅れをdt_1、制御力の計算や電気信号を油圧に置き換えるのに伴う作用時間遅れをdt_2とすれば、$dt_1 + dt_2$の遅れを考慮した定式化が必要となる[2]。制御力に作用時間遅れdt_2がある場合の運動方程式は次式で表される。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -m\ddot{X}(t) + Hu(t - dt_2) \quad (5)$$

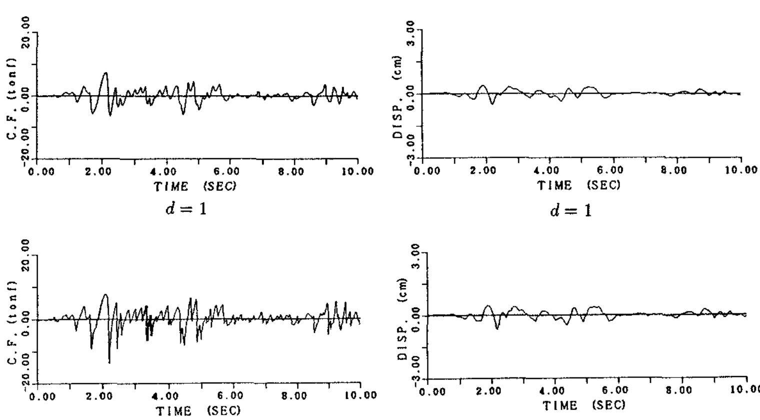
これを離散化するためにサンプリング時間間隔で積分する。現時刻をkステップ、観測時間遅れをλステップ、作用時間遅れをdステップと考えた。ここで次数をkまで下げることによって得られる式を状態方程式とする。時刻k以降における入力地震動は2. で述べた方法で予測を行い、制御力は時刻k以降も時刻kと同じ値が作用すると仮



図－１　解析モデル



図－２　NO CONTROL



制御力　　変位

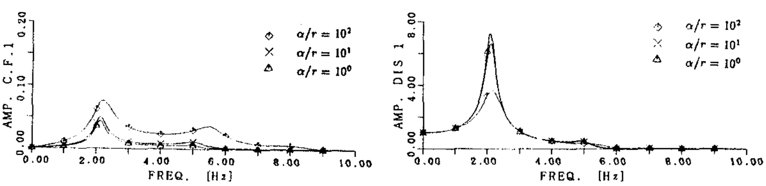
図－３　dが変化する場合の変位と制御力

定する。評価関数としては構造物に入力するエネルギーの項を考え、次式のように定義する。

$$J = z^T_{k+\lambda+d} Q z_{k+\lambda+d} + u_k^T R u_k + \alpha \int_0^t \dot{x}(r) H u(r - dt_2) dr \tag{6}$$

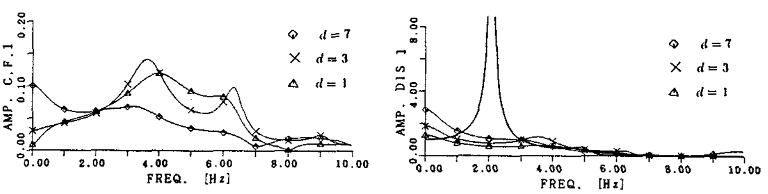
状態方程式を制約条件式とすれば、評価関数(6)を最小にする制御力を求めることができる。解析モデルを図－1に示す。バネ特性は線形とした。図－2に制御力が働かない場合の質点1の変位を示す。図－3には$d=1,5$とした場合の質点1の変位及び制御力を示す。dが大きくなると、特に制御力が大きく求まることが分かる。一方、$d=1$とし$\lambda=1,5$とした場合では変位、制御力ともあまり変化はみられなかった。一般に制御力の時間遅れは観測時間遅れと比べて大きくなると考えられる。つまり、dはλよりも大きくなりやすく、それは容量の大きなアクチュエータが必要となることを意味する。このことは、経済的にも不利であり、また過大な制御力による構造物への影響も無視し得ない。ゆえに、制御力が過大に働かないように式(6)の重みQ, R, αを適切にとるべきである。

4. 制御力が働く場合の周波数応答関数　地震などの外乱による震動を制御するために制御力が作用すれば、系の周波数特性は変化するものと考えられる。これをZ変換を用いることによって、周波数応答関数を求める[3]。Z変換の離散システムへの導入の方法は、時間のシフトに対して次のようである。時刻kにおける状態量をz_k、時刻$k+1$における状態量をz_{k+1}とした時、時刻kの状態量のZ変換を$Z(z)$とすれば時刻$k+1$の状態量のZ変換は$e^{-i2\pi f\Delta t}Z(z)$と表現できる。ここでfは振動数を、Δtは状態量Zのサンプリング時間間隔をあらわす。この手法を用いて、変位及び制御力の周波数応答関数を求めることができる。図－4には制御力が働く場合の質点1の変位及び制御力の周波数応答関数を示す。α/rは重みの比率であり、大きくなれば入力エネルギーに対する重みが増大することを示す。図－5には$\lambda=1$で、$d=1,3,7$と変化する場合の変位及び制御力の周波数応答関数を示す。印のないものは制御力が働かない場合の応答関数である。全体的に変位は抑えられていると考えられるが、低周波領域においては、応答値がやや大きくなることがわかる。また制御力も低周波領域で大きくなる傾向がみられた。



制御力　　変位

図－4　α/rが変化する場合の周波数応答関数



制御力　　変位

図－5　dが変化する場合の周波数応答関数

5. 結論　本研究で提案した方法において、制御力の時間遅れが大きくなれば、より大きな制御力が必要となることが分かった。しかし変位は適切に抑えられており、十分な震動制御効果が得られると考えられる。

参考文献　1) 片山　徹:応用カルマンフィルタ,朝倉出版,1983.　2)J.Rodellar,L.L.Chung,T.T.Soong and A.M. Reinborn:Experimental Digital Control of Structures,Journal of Engineering Mechanics, Vol.115,No.6,June. 1989.　3) 小島紀夫, 篠崎寿夫:Z 変換入門, 東海大学出版会,1981