構造物の震動制御における作用時間遅れに関する研究

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　学生会員　○橋本　雅道

1．まえがき　近年わが国の耐震設計における思想は、免震構造物に代表されるような受動的な考えから、より積極的に揺れを制御しようといった能動的な考えに変わりつつある。この能動的な設計思想の一つとして最適制御則を用いた構造物の震動制御が挙げられる。本研究では構造物に入力するエネルギーを考慮した定式化を行うことにより外力も考慮した閉開ループ制御則を構築する。また制御力が作用するまでの時間遅れを考慮した定式化を行い、時間遅れが震動制御効果に及ぼす影響を考える。さらに、時間遅れを考慮するにあたって未来の入力地震動を予測する必要があるので、地震動を自己回帰過程で表現し、カルマンフィルタを用いて自己回帰過程の係数を同定し、地震動を予測する方法を提案する。

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。

$$g_t = -\alpha_1 g_{t-1} - \alpha_2 g_{t-2} - \cdots - \alpha_q g_{t-q} + v_t \tag{1}$$

$$\hat{\alpha}_{t+1|t} = I\hat{\alpha}_{t|t} \tag{2}$$

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。同定された α の時刻歴を図-1に示す。(q=3)

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

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。

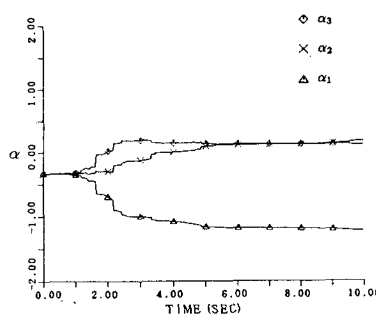

図-1　α の時刻歴

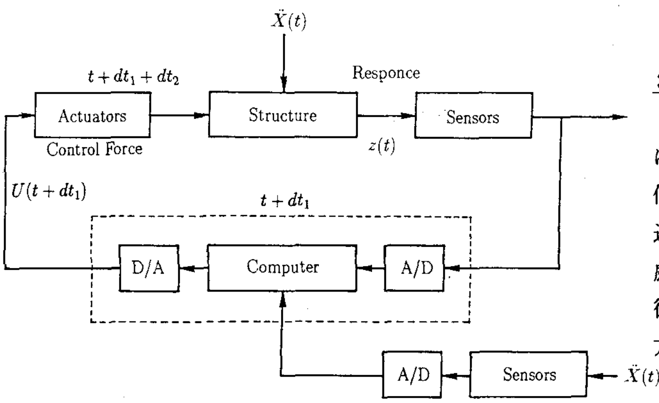

図-2　システム図

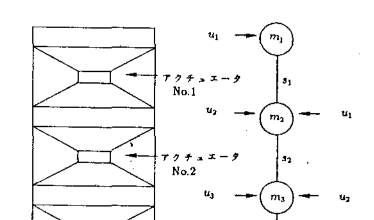

図-3　解析モデル
(Active Tendon)

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（図-2）[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。

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

これを離散化するためにサンプリング時間間隔で積分し、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ステップとし、また状態量として、変位と速度を合わせたベクトルｚを導入し、次数をｋまで下げることによって得られる式を

Tadanobu SATO　Kenzo TOKI　Masamichi HASHIMOTO

状態方程式とする。時刻kに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。

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

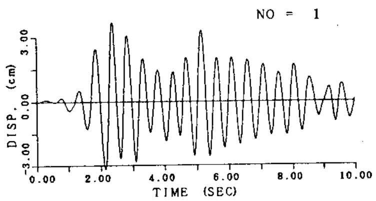

図-4　NO CONTROL

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。図-4に制御力が働かない場合の質点1の変位の応答値を示す。図-5にはλ=1で、dが1、5と変化する場合の質点1の変位と制御力を表す。dが大きくなると変位はあまり大きくならないが制御力はかなり大きく求まることが分かる。一方、d=1としλを1、5とした場合は変位、制御力ともにあまり変化はなかった。また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。

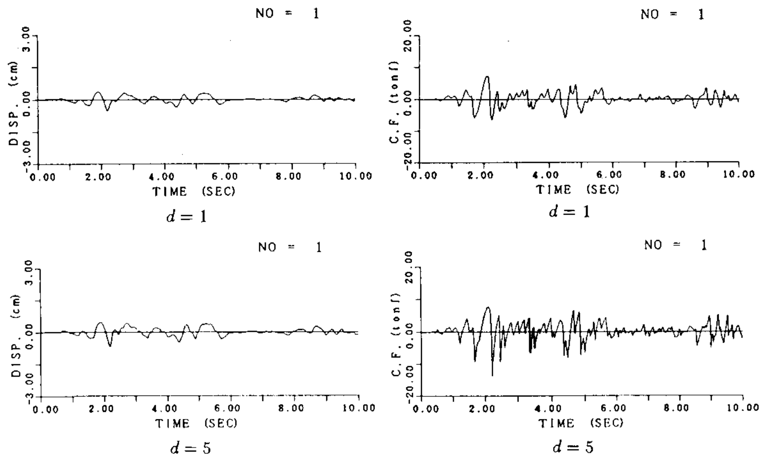

図-5　dが変化する場合の変位と制御力

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]。時間遅れがある場合の質点1の変位の周波数応答関数を図-6に示す。グラフに印がないものは制御力が働かない場合の応答関数である。dが大きくなっても変位に関してはあまり大きな変化はないと思われる。しかし、低周波領域においては、dが大きくなれば、応答値も大きくなることが分かる。

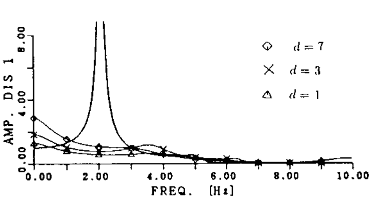

図-6　変位の周波数応答関数

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