

I-625

可動質量型制振装置を用いた構造物の閉開ループ震動制御

京都大学防災研究所 正会員 佐藤忠信
 京都大学工学部 正会員 土岐憲三
 (株)大林組 ○望月俊宏

1.はじめに 可動質量型制振装置を用いて構造物の震動応答を閉開ループ制御する場合に、その制御効率について詳細な検討を加える。また、スピルオーバー現象について、その発現機構を明らかにするとともに、それを回避して制御する方法についても考察を行う。

2.閉開ループ制御則 従来の制御則では考慮されなかった地震動の特性を直接反映した制御量を導くため、構造物に入力される地震エネルギーを考慮した次式の評価関数を用いる。

$$J(t) = \int_{t-\infty}^t \left[\dot{z}^T(\tau) Q \dot{z}(\tau) + u^T(\tau) R u(\tau) + \alpha \left\{ -\ddot{x}^T(\tau) \{m\} \ddot{X}_0(\tau) \right\} \right] d\tau \quad (1)$$

ここで、 Z は状態量、 u は制御量、 $\ddot{X}_0$ は地震加速度、 Q は状態量にかかる重み、 R は制御量にかかる重みであり、パラメーター α を介して構造物に入力される地震エネルギーが評価関数に考慮されている。また、地震加速度は現時刻までしかわからないことから、現時刻までの情報のみで制御量が決定できるように評価関数は時間依存型¹⁾とした。次に、制御量は、式(1)の評価関数を最小にするように決定される。これを次式に示す。

$$u(t) = \{F_{\dot{z}}\} \{\dot{x}\} + \{F_{\ddot{z}}\} \{\ddot{x}\} + F_{\ddot{X}_0} \ddot{X}_0 \quad (2)$$

ただし、

$$F_{\ddot{X}_0} = \Delta t^2 / 8 \alpha / r \quad (3)$$

表1 各モードの外乱を双殺する α/r

Mode No.	1	2	3	4	5	6	7	8
α/r	57	-20	13	-10	9	-8	8	-7

ここで、 $\{F_{\dot{z}}\}$ 、 $\{F_{\ddot{z}}\}$ 、 $F_{\ddot{X}_0}$ はそれぞれ応答変位、応答速度、地震加速度にかかるゲインである。制御量は右辺第1項、第2項の状態量のフィードバックによる項（閉ループ制御）と地震加速度のフィードフォワードによる項（開ループ制御）の2つからなり、閉開ループ制御則となっている。

3.パラメーター α/r の決定 閉開ループ制御則における開ループの制御量について述べる。開ループ制御量は式(3)よりパラメーター α/r により決定される。まず、系の運動方程式をモード変換し、第 i 次の方程式を式(4)に示す。

$$\ddot{q}_i + \zeta_i \dot{q}_i + \Omega_i q_i = -\{\phi_i\}^T \{m\} \ddot{X}_0 + \phi_i^{-1} u \quad (4)$$

この i 次モードを完全に低減させるには、式(4)の右辺の項を0にして i 次モードを刺激する外乱をゼロにする制御量 $u = F_{\ddot{X}_0} \ddot{X}_0$ を決定すればよい。モードごとに刺激係数は異なるため α/r はモードの数だけ存在する。この値を表1に示す。

4.解析結果 図1に閉ループ制御、開ループ制御を比較した結果を示す。図は最上階の最大応答変位を非制御時の値で割って正規化した正規化最大応答変位と最大制御量の関係を表わしている。閉ループ制御を示す曲線(△)に比べて開ループ制御を示す曲線(×)が常に右側に存在しているということは、最大値が同じ制御量を供

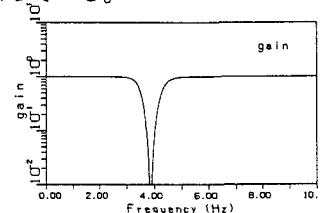


図2 帯域阻止フィルタの特性

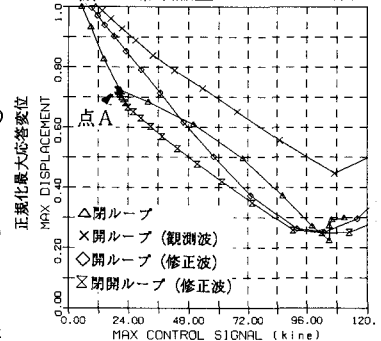


図1 閉ループ、開ループ、閉開ループの比較

給しても開ループ制御では閉ループに比べて応答を低減できないことを意味している。この原因として次の2点が挙げられる。

1. 開ループ制御量は観測地震加速度を基に決定されるので、制御対象ではないモードの振動成分を多く含む。この結果、主要モードは低減できても非制御モードが励起し、応答変位が十分低減しない。
2. 開ループ制御量の最大値は観測地震加速度の最大値に比例する。このため閉ループ制御と比べて最大制御量が大きくなる。

上記の2つの問題点を解決するため、観測地震加速度をそのまま用いて開ループ制御量を決定するのではなく、フィルターを用いて修正した地震加速度を基に制御量を決定した。この場合に用いるフィルターには、1) 通過域の位相を遅らせない、2) 非制御モード（特に2次モード）のゲインを小さくする、という2つの特性が要求される。本研究では、このフィルターとして図2に示す帯域阻止フィルター²⁾を用いた。このフィルターで修正した地震加速度を基に開ループで制御した結果を図1の◇印で示す。この結果、観測地震加速度を用いた開ループ制御（×）と比べると、同じ制御量（72kineの場合）に対して最大応答変位を4割程度低減できることがわかった。さらに、最大制御量が20kine以下では閉ループで制御したほうが効率が良いことから、図の点Aまでは閉ループ制御、それ以降は開ループ制御（修正波を使用）を加えた閉開ループ制御による効率を調べた。この結果を図1の×印で示す。この結果、閉ループ制御（△）と閉開ループ制御（×）を比較すると、閉開ループで制御したほうが1/4～1/3最大応答変位を余分に低減することができた。

5. 観測スピロオーバー現象 状態量のみを用いて制御量を決定する場合には、応答の観測値が必要である。しかし、観測点の数や位置を不適切に設定すると制御の対象であるモードの正確な情報が得られないために、制御量を加えることによって系が不安定になる現象が発生する。この場合に生じる発振現象が観測スピロオーバー³⁾である。本研究では、この現象の発現がモード形と観測位置の係に密接な関わりを持つことを明らかにした。すなわち、モード形の腹にあたる階で応答を観測しておけば観測数にかかわらず系を安定に制御でき、そうでない場合には不安定現象が発生する。例えば2点観測で観測位置を（8階、3階）（8階、6階）として、制御した場合の最上階の応答変位を図3に示す。8階と3階を観測した場合、ともに2次モードの腹にあたる階でしかも逆位相なため2次モードの情報はセンサーより正確に得ることができる。従って系は不安定にはならず十分に制御できている。一方、8階と6階を観測した場合には、6階が2次モードの節にあたるため6階の応答観測センサーからは2次モード以外のモードの情報が観測される。この結果、同じ制御ゲインで制御しても図のように発振現象が生じる。従って、観測位置に十分注意すれば発振現象を制御できることがわかった。次に、何らかの理由で観測位置を変えられないような場合には直接、発振現象を抑える別の手段が必要となる。この場合、発振するモードが特定のモードであること、それを刺激する振動成分が制御量に含まれているのが原因であること、に着目し帯域阻止フィルターを用いて制御量からその振動成分を除去することを試みた。この結果を図4に示す。この結果、フィルターを用いることで発振現象を直接抑えることも可能であることがわかった。

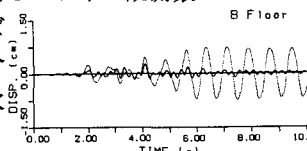


図3-1 (8階、3階)の2点観測制御

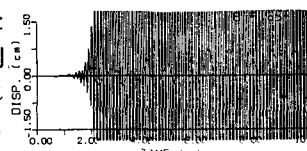


図3-2 (8階、6階)の2点観測制御

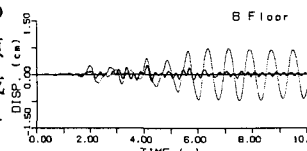


図4 フィルターを用いて(8階、6階)の2点観測制御

参考文献 1) J.N.Yang, A.Akbarpour and P.Ghaemmaghami: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE, Vol.113, No.9, pp.1369-1386, Sep., 1987. 2) 尾知博: デジタルフィルタ設計入門, CQ出版株式会社, pp.74-138, 1991-1 3) 吉田和夫, 下郷太郎, 猪瀬潤: スピロオーバーを考慮する弾性構造物系の最適制御, 日本機械学会論文集 (C編), pp.201-207, 54巻497号, 昭和63-1