

I-183

AMDの制震効果に及ぼす最適フィードバック制御法の重み係数の影響

建設省土木研究所 正員 川島 一彦  
 正員 蓮上 茂樹  
 東北地建福島工事事務所○正員 清水 英之

1. まえがき

本文は、最適フィードバック制御法を用いたAMDの制震効果に及ぼす重み係数の影響について1自由度振動系を対象に検討した結果をまとめたものである。

2. 地震応答解析法及び解析条件

図-1に示すように1自由度振動系にAMDを取り付けた場合の運動方程式は、次式のように表わされる<sup>1)</sup>。

$$\dot{X} = A X + B u + V \dot{X}_0 \quad (1)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $V$ は、構造物及びAMDの質量、減衰、剛性から定まるマトリックスであり、 $X$ は構造物及びAMDの駆動マスの速度及び変位ベクトル、 $u$ はAMDを駆動する制御力、 $X_0$ は地動変位である。フィードバック制御法によれば、制御力 $u$ は次式で与えられる。

$$u = G X \quad (2)$$

ここで、 $G$ は制御ゲインマトリックスであり、最適な制御ゲインは次の2次評価関数を最小にするマトリックスとして求められる。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + R u^2) dt \quad (3)$$

ここで、 $Q$ は、構造物及びAMDの駆動マスの変位及び速度に関する重み係数、 $R$ は制御力に関する重み係数を示し、これらの重み係数の与え方によって応答の制震効果や必要とされる制御力の大きさが定められる。最適な制御ゲイン $G$ は、Riccatiの代数方程式を解くことにより求められる。

解析対象としたのは、図-2に示すような橋長90mの3径間連続橋であり、この橋の橋軸方向の1次固有振動を1自由度系にモデル化した<sup>1)</sup>。上部構造の重量及び固有振動数は、それぞれ、1,035tf、0.99Hzである。また、解析結果の解釈を簡単にするため、橋自身が有する減衰定数は0と仮定した。AMDの駆動マスの質量の大きさは、そのストローク(相対変位)には大きな影響を与えるが、構造物に対する制震効果には影響を及ぼさない<sup>1)</sup>。このため、ここではAMDの駆動マスの重量は、上部構造重量の1/100(10.35tf)と仮定した。入力地震動としては、1978年宮城県沖地震により開北橋近傍地盤上で得られた記録を用いた。入力加速度は記録時の値をそのまま用い、最大加速度は413cm/s<sup>2</sup>とした。

式(3)に示した重み係数マトリックス $Q$ は次式のように仮定することとした。

$$Q = \begin{bmatrix} Q_s^v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_d^v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_s^d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_d^d \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $Q_s^v$ 、 $Q_s^d$ は、それぞれ、構造物の相対速度、相対変位に対する重み係数であり、また、 $Q_d^v$ 、 $Q_d^d$ は、それぞれ、AMDの駆動マスの相対速度及び相対変位に対する重み係数である。

3. 解析結果

重み係数が制震効果に及ぼす影響を検討するため、AMDの駆動マスの応答速度及び応答変位には制限を加えずに、AMDに作用させる制御力のみを最適化に考慮するものとし、 $Q_d^v = Q_d^d = 0$ とした。これは、制御力の範囲内で最大限にAMDの性能を発揮できる場合に相当する。したがって、ここで検討するのは構造物の応答速度及び応答変位に対する重み係数 $Q_s^v$ 、 $Q_s^d$ の影響である。また、AMDの制御力に関する重み係数 $R$ は $10^{-6}$ に固定した。

図-3は、重み係数 $Q_s^v$ 及び $Q_s^d$ を同一と仮定し、その値を変化させた場合の橋の応答変位の時刻歴を示したものである。重み係数 $Q_s^v$ 及び $Q_s^d$ を0とした場合、すなわち、AMDを駆動させない場合には、応答変位は地震入力とともに増大し、地震入力小さくなった後はほぼ一定の振幅で自由振動する。一方、重み係数 $Q_s^v$ 及び $Q_s^d$ を $10^6$ とした場合には、非制御の場合に比較して、橋の最大応答変位及び最大応答加

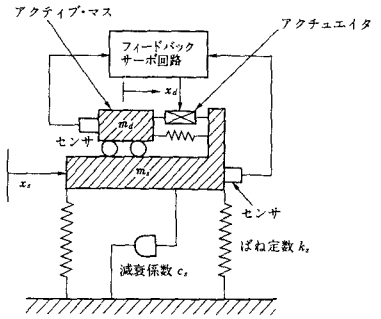


図-1 AMDによる制御を受ける1自由度振動系

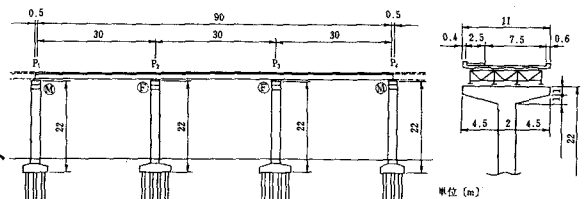


図-2 解析対象とした橋

速度はともに約1/3に低下する。この時のAMDの駆動マスの最大ストロークは88cm、最大制御力は31tfである。重み係数 $Q_s^v$ 及び $Q_s^d$ を $10^{12}$ まで大きくすると、応答変位は非制御の場合の約1/190に低下し、橋は地盤とほぼ同一の振動をするようになる。ただし、この時のAMDの駆動マスのストロークは最大で595cm、制御力は最大で418tfと非常に大きくなる。このように、重み係数 $Q_s^v$ 、 $Q_s^d$ を大きくすることによって橋の変位応答を任意に小さくすることが可能となる。

図-4は、橋の最大応答変位及び最大応答加速度(絶対応答加速度)が重み係数 $Q_s^v$ 、 $Q_s^d$ に応じてどのように変化するかを示したものである。図-4(a)によれば、橋の最大応答変位は $Q_s^d$ 及び $Q_s^v$ が大きくなるほど減少する。また、同一の $Q_s^v$ では、 $Q_s^d$ が増大するにつれて変位の低減効果が大きくなる。ただし、ここで重要なのは橋の速度に関する重み係数 $Q_s^v$ がある値以下では、 $Q_s^d$ を変化させても橋の応答は変化しない点である。たとえば、 $Q_s^d=10^6$ とした場合には $Q_s^v$ を $10^{-2} \sim 10^4$ と変化させても橋の応答変位は低下しないが、 $Q_s^v$ を $10^6$ 以上にするると橋の応答変位は大きく減少する。

一方、図-4(b)によれば、橋の最大応答加速度は重み係数の取り方によって複雑に変化する。すなわち、 $Q_s^d$ が $10^2 \sim 10^6$ と比較的小さい範囲では、 $Q_s^v \approx 10^6$ あたりに橋の最大応答加速度が最も小さくなる重み係数が存在する。ただし、 $Q_s^v$ をさらに大きくすると、前述したように橋の応答変位は小さくなるかわりに、橋は地震動と同じ振動をするようになるため最大応答加速度は再び大きくなり、地震動入力に最大値に漸近していく。 $Q_s^d=10^{10}$ と大きく設定した場合には、 $Q_s^v$ が $10^8$ 程度までは $Q_s^v$ によらず制震効果はほぼ同じである。 $Q_s^v$ を $10^{10}$ 以上とさらに大きくすると上記と同様に橋の最大応答加速度は再び大きくなる。

4. 結論

1) 橋の応答変位及び応答速度に対する重み係数を大きくするほど制震効果は大きくなる。ただし、重み係数がある値以上にすると橋の相対変位は小さくなり、地震動と同じ振動をするようになる結果、橋の応答加速度は地震動加速度以下には低減されない。

2) 本解析で対象とした3径間連続橋では、重み係数 $Q_s^d$ 及び $Q_s^v$ を $10^6$ 程度に設定すれば、AMDのストロークは約90cm、制御力は約31tfとなり、AMDの設計、製作上実用的な範囲に収まる。この際、橋の応答は非制御の場合と比較して約1/3にまで低減可能である。

参考文献1)川島一彦、長谷川金二、吉田武史：アクティブ・マス・ダンパーによる構造物の地震応答制御、土木技術資料31-5、1989年5月

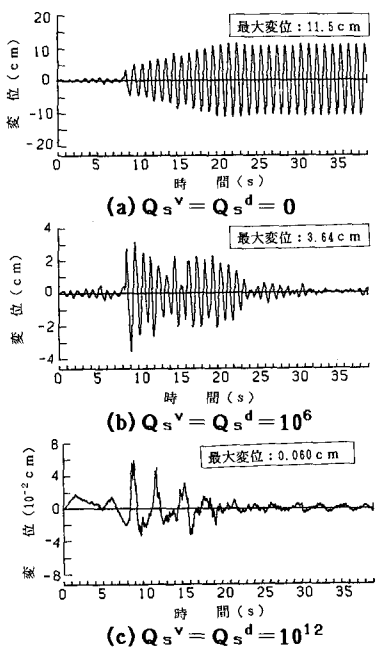


図-3 橋の応答変位に及ぼす重み係数の影響

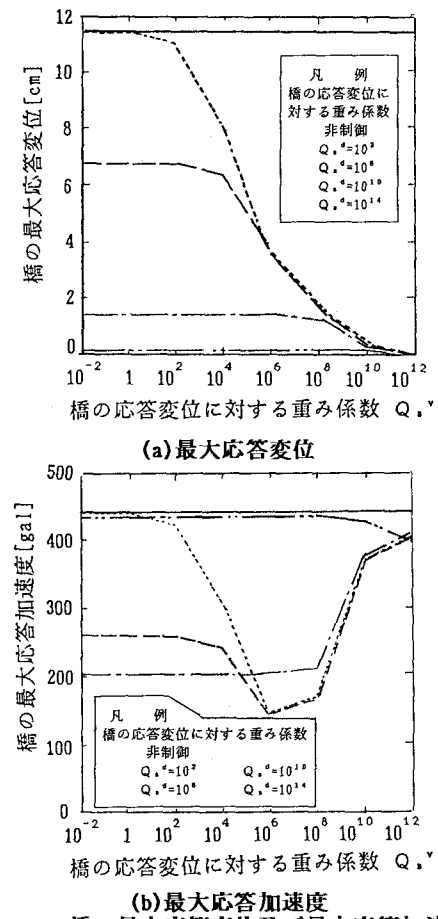


図-4 橋の最大応答変位及び最大応答加速度に及ぼす重み係数 $Q_s^d$ 及び $Q_s^v$ の影響