

建設省土木研究所 正員 川島 一彦
正員 運上 茂樹
正員○清水 英之

1. まえがき

本文は、制震設計に関する研究の一環として、多自由度系から成る橋にアクティブ・マス・ダンパーを取り付けた場合の、制震装置の最適な設置位置を検討するとともに2点で制御とした場合の制震効果について検討した結果をまとめたものである。

2. 解析方法

多自由度構造物にAMDを取り付けた場合の運動方程式は次のように表わすことができる。

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -M\mathbf{V}_0\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{V}_u\mathbf{u} \quad (1)$$

ここで、 M 、 C 、 K は構造物系にAMDを加えた全体系の質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $\mathbf{x}$ は全体系の相対変位ベクトル、 $\mathbf{x}_0$ は地震動加速度、 $\mathbf{V}_0$ は地震動の作用点を示すベクトル、 $\mathbf{u}$ は制御力ベクトル、 $\mathbf{V}_u$ は制御力作用点を示すベクトルである。AMDの制御は、最適フィードバック制御法によるものとし、このようにすると制御力 $\mathbf{u}$ は構造物及びAMDの変位及び速度に比例して、 $\mathbf{u} = \mathbf{G}\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{y} = \{\dot{\mathbf{x}} \quad \mathbf{x}\}^T$ で表わされる。ここで、 $\mathbf{G}$ 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与えられる。

$$J = 1/2 \int_0^\infty (\mathbf{y}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ は、それぞれ速度と変位項に関する重み係数マトリックス及び制御力項に関する重み係数マトリックスを示す。なお、制御ゲインは、Ricattiの代数方程式を解くことにより求められる。

3. 解析条件

解析では、図-1に示す橋長150mの3径間連続橋の橋軸直角方向を対象とした。解析モデルは、2次元平面骨組みモデルとした。図-2に、橋軸直角方向の基本固有振動モードを示す。1次固有振動数は1.67Hzで上部構造の1次の変形モードである。AMDの駆動マスの重量は、1点で制御する場合には橋梁の上部構造重量(1,950tf)の約1/10に相当する180tfとした。2点で制御する場合には、 P_1 及び P_2 橋脚上に各1個のAMDを取付け、駆動マスの重量は共に180tfとした場合と、共に90tfとした場合の2ケースを解析した。なお、駆動マスを支持するためのばね係数は、これによって支持される駆動マスの固有振動数が対象橋の1次の固有振動数の1/4になるように定めた。また、橋梁自体の減衰定数は5%とした。入力地震動としては、道路橋示方書V耐震設計編に示されるII種地盤用の標準地震入力波を用いた。

最適フィードバック制御法における重み係数は、次式のように与えた。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \dots & Q_{s1}^v & \dots & Q_{d1}^v & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & Q_{s1}^d & \dots & Q_{d1}^d & \dots \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & \dots & R_j & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 Q_{s1}^v 及び Q_{s1}^d はそれぞれ橋の第1自由度の速度及び変位に対する重み係数を、また、 Q_{d1}^v 及び Q_{d1}^d はそれぞれ第1番目のAMDの速度及び変位に対する重み係数を示す。 R_j は第j番目のAMDの制御力に対する重み係数を示す。 $\mathbf{Q}$ 及び $\mathbf{R}$ は、式(3)に示すように、対角要素のみに値を与えた。以下に示す解析では、別途、重み係数を検討した結果に基づき、桁の応答に対する制震効果が大き

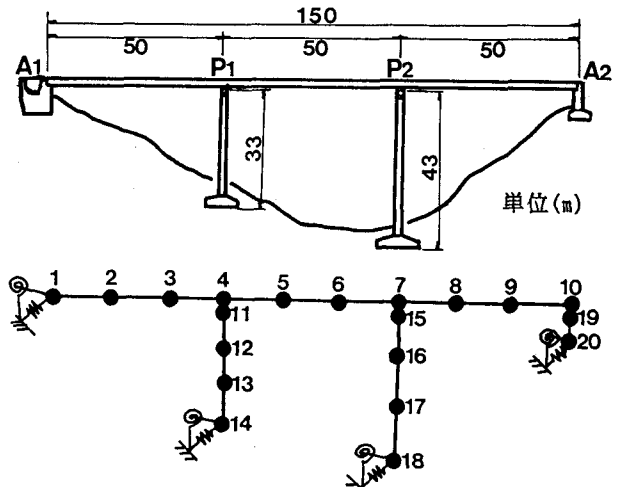


図-1 解析対象とした橋梁とその解析モデル



図-2 固有振動モード

い $Q_{s1}^v = Q_{d1}^v = Q_{d1}^d = 0$, $Q_{s1}^d = 10^{10}$, $R_j = 1$ の重み係数を用いた。

3. 解析結果

どこに AMD を取り付けるのが効果的かを検討するために、桁の各位置に、順次、180tf の重量を有する AMD を取り付けて応答を解析した。図-3 は桁の最大応答変位及び最大応答加速度を示したものである。桁の中央付近(節点6)に AMD を取り付けた場合に最も制御効果が大きく、橋台近くに AMD を設置した場合には制震効果が小さい。

次に、複数点制御の影響を検討するため、 P_1 橋脚位置(節点4)と P_2 橋脚位置(節点7)の2箇所に AMD を取り付けた場合を解析した。図-4 は2箇所に AMD を取り付けた場合の桁の最大応答変位及び最大応答加速度を示したものである。なお、比較のために1点で制御した場合についても示してある。2点に AMD を取り付けた場合と1点だけで制御する場合に比較して桁の最大応答変位、最大応答加速度はともにより低下する。また、2点で制御する場合に AMD の駆動マスの重量が90tf の場合と180tf の場合とでは、最大応答変位及び最大応答加速度はともにほぼ同じである。

4. まとめ

以上の解析結果から得られた結論をまとめる以下のとおりである。

①連続橋の橋軸直角方向の振動を1台の AMD で制御するためには、卓越する振動モードが最も大きくなる位置に取り付けるのがよい。

②2台の AMD を用いて制御する場合には、1台の AMD を用いて制御する場合よりも桁の応答変位及び応答加速度はより小さく制震できる。複数の AMD を分割して桁に設置することは、どのようなモード形に対しても制御が行なえるようになり、今後さらにその特性を検討していきたい。

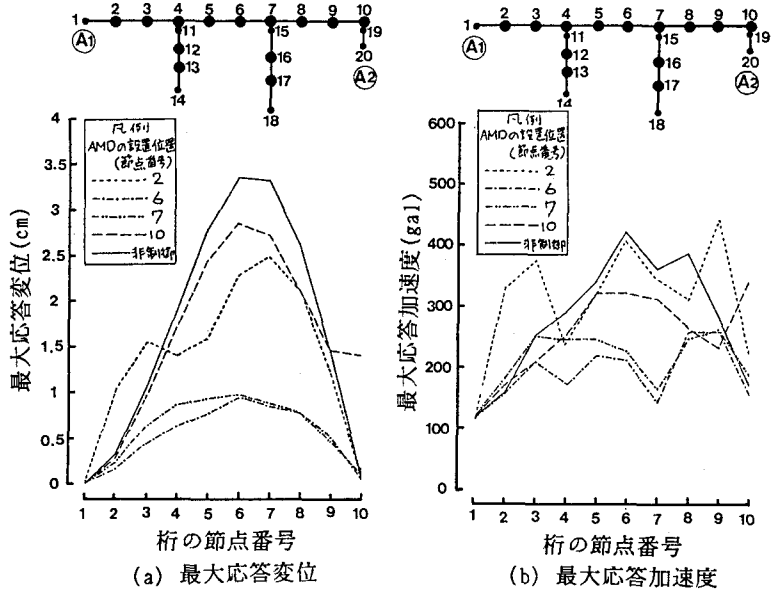


図-3 制御点を変化させた場合の桁の最大応答変位及び最大応答加速度の変化

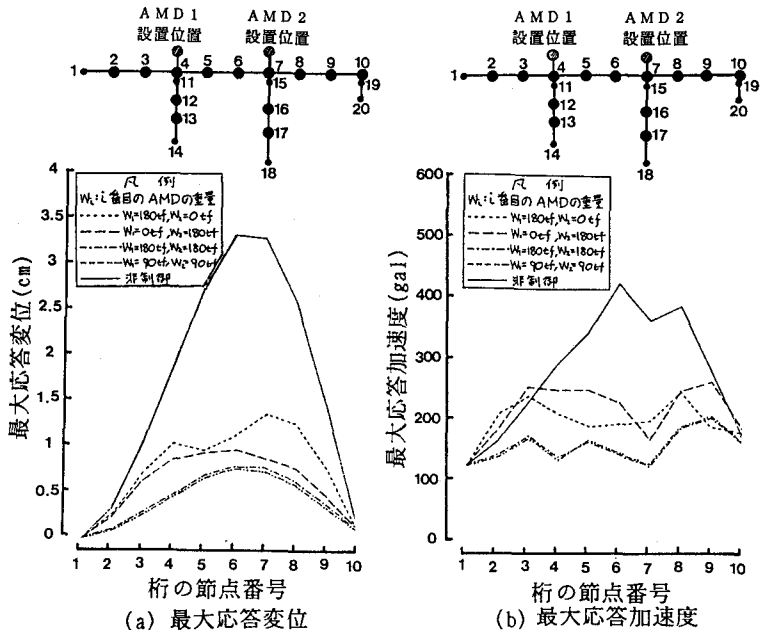


図-4 2点制御において、AMD の重量を変化させた場合の桁の最大応答変位及び最大応答加速度の変化