

## I-636

## 高架橋の交通振動に対するアクティブ制御

東京大学大学院 学生員 笠原 寛

東京大学 正員 藤野 陽三

東京大学 正員 ビノド K. バルティア

## 1 はじめに

近年、都市内高架道路周辺で交通振動公害といわれる問題が生じている。これは、橋桁と車両の連成振動が橋脚を介して周辺地盤に伝わり家屋などを振動させることにより周辺住民の不快感や睡眠妨害等を引き起こす現象である。現在まで、交通振動に対してTMDやダンパー方式<sup>1)</sup>などパッシブな制振方法を取り入れた様々な検討が行われているが、必ずしも有効な制振効果が得られていない。アクティブコントロールを用いた解析や実験的検討も行われているが、アクティブコントロール理論の単純な応用にとどまっている。本研究では、交通振動に特有な現象を取り込んだ理論に基づく制御法を検討し、その制振効果を調べる。すなわち、振動制御の対象である桁-車両系は時間とともにその質量、剛性などが変化する可変系であり、その可変性を取り入れた最適制御を導き、効果を調べる。具体的には、制御則をたてるにあたり、車両の情報を含め可変系として扱った場合と桁のみの情報で制御する場合の2通りを考え、車両の情報の影響について検討している。

## 2 解析モデル

解析モデルとして車両は1自由度系に理想化し、桁は単純桁で4次モードまでを考慮した。そして、桁中点にATMD (ActiveTMD)を1つ設置し、車両が桁上を走行する際はアクティブコントロールを行う。なお、車両通過後の自由振動はTMDによる制振を考える。このモデルを図1に示す。桁-車両系をモデル化すれば、状態方程式は式(1)のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{F}(t) \quad (1)$$

ここで $\mathbf{x}(t)$ は桁・車両・TMDの振動速度・変位、 $u(t)$ は制御力、 $\mathbf{F}$ は路面凹凸による外乱である。車両が走行する故に $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$ は時間の関数となるのが、本問題の特徴である。

3 最適制御理論<sup>2)</sup>

本研究ではフィードバック方式を採用し、最適制御を行った。用いた評価関数は以下のものである。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + u(t) \mathbf{R} u(t)) dt \quad (2)$$

ここに $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ は重み係数行列、 $t_f$ はアクティブコントロールを作用させる終端時刻(車両が桁を通過する時間)である。この評価関数を最小にするために式(3)のリカッティ行列方程式を解く。

$$\dot{\Lambda}(t) - \Lambda(t) \mathbf{B}(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Lambda(t) + \Lambda(t) \mathbf{A}(t) + \mathbf{A}^T(t) \Lambda(t) + \mathbf{Q} = 0 \quad (3)$$

ここで $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ は桁-車両系を扱う場合には時間変化するため、式(3)を終端時刻より逆時間方向に解いて、ゲイン(式(4))を時間依存の形で求める必要がある。

$$\mathbf{G}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Lambda(t) \quad (4)$$

## 4 交通振動のシミュレーション

運動方程式<sup>3)</sup>は、Runge-Kutta法で数値積分を行った。解析に用いた桁、車両、TMDの諸元は表1に示す通りである。なお、桁上の路面凹凸はISOの評価基準で「良好」に属するパワースペクトル密度を有するものを仮定し、これをもとにシミュレートされたサンプル関数を用いた。桁自体の制振という点で桁中点の鉛直加速度を、周辺地盤への影響という点で橋脚の動的支点反力について検討した。

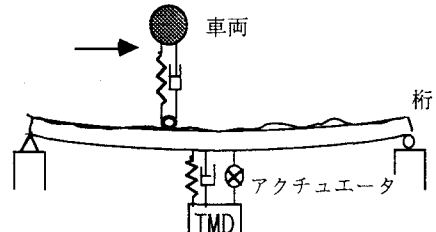


図1 桁-車両系モデル

表1 桁・車両・TMDの諸元

| 桁の諸元      |                                      |
|-----------|--------------------------------------|
| スパン       | 40.0 m                               |
| 単位長さ当たり質量 | 3.306 t/m                            |
| 曲げ剛性      | $3.15 \times 10^6$ tf m <sup>2</sup> |
| 減衰定数      | 2% (1~4次)                            |
| 固有振動数     | 3.0 Hz                               |
| 車両の諸元     |                                      |
| 質量        | 19.47 t                              |
| 減衰係数      | 1.380 tf/(m/s)                       |
| ばね定数      | 447.5 tf/m                           |
| 固有振動数     | 2.4 Hz                               |
| 速度        | 20.0 m/s                             |
| TMDの諸元    |                                      |
| 質量        | 3.306 t<br>(モード質量の5%)                |
| 減衰定数      | 12.8%                                |
| ばね定数      | 110.7 tf/m                           |
| 固有振動数     | 2.86 Hz                              |

#### 4.1 アクティブコントロールの制振効果

車両の正確な情報を用いて制御則をたて、さらに桁と車両の応答をセンシングして制御をおこなった時（制御則1）の桁中点加速度、動的支点反力を図2、図3に示す。桁中点加速度においては大きな低減があるが動的支点反力については桁中点加速度ほどの低減はみられない。しかし、動的支点反力のパワースペクトル（図4）をみると交通振動に影響の大きい3 Hz付近においては大きな低減を示しており、アクティブコントロールは交通振動に対して有効な手段であるといえる。

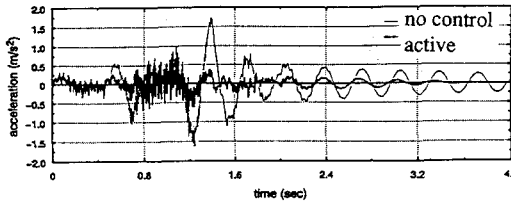


図2 桁中点加速度

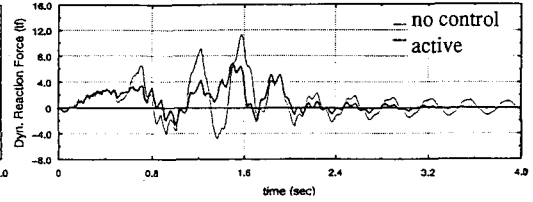


図3 動的支点反力

#### 4.2 アクチュエータのエネルギー

重み係数Rをパラメータとして桁中点加速度の非制振時に対する低減率とアクチュエータのエネルギーの関係を示したのが図5である。横軸は非制振時の標準偏差に対する低減率で、縦軸は車両の正確な情報が解った場合の桁中点加速度を約50%低減する時のエネルギーで除したものである。

制御則1 桁+車両でモデル化を行い、桁・車両の応答をセンシングする

制御則2 桁のみでモデル化して、桁の応答をセンシングするとして制御効率を調べた。車両も含めた制御則1は制御則2に比して、制御効率は著しく高いことが分かった。

#### 4.3 車両情報の誤差の影響

車両が桁に進入する以前にロードセルやフーリエ変換などでその車両の動特性を求めても誤差を含むことは当然ありうる。得られた車両の質量に誤差があった場合を、正確に車両の情報が得られた場合と比較し図6に示す。ここに+20%は実際の車両の質量を20%多く見積った時で、逆に-20%は20%少なく見積った時である。得られた車両の情報に20%程度の誤差があったとしてもそれが制御効率に及ぼす影響は小さいといえる。これは車両の減衰、ばね定数の情報に誤差があった場合も同様のことがわかった。

#### 5 あとがき

以上のことがわかったが、車両が2台以上走行してくる場合にも、車両の情報があらかじめわかれば、本研究と同様の制御則を用いて、アクティブコントロールの効果が期待できるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 比江島・藤野：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減、土木学会論文集、第465号、pp.107～116.1993
- 2) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993
- 3) J.Lin, J.Yu他：DYNAMIC MODELING FOR BRIDGE VIBRATION CONTROL, Trans. Res. Board Ann. Meeting, August, 1993

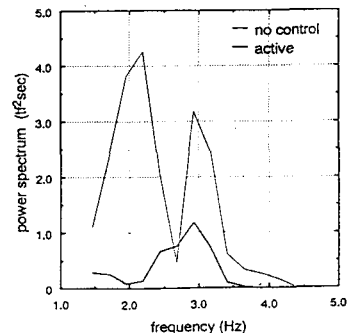
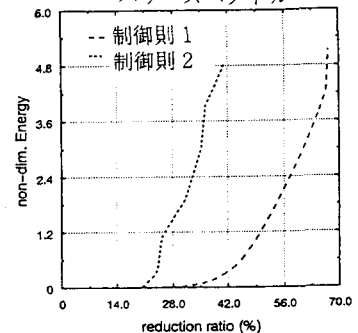
図4 動的支点反力の  
パワースペクトル

図5 低減に必要なエネルギー

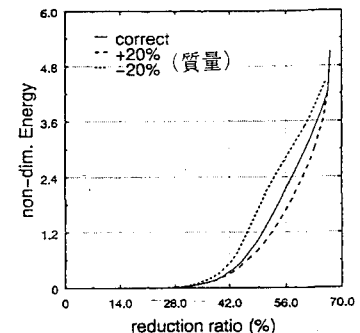


図6 低減に必要なエネルギー