

模型と歩道橋の振動の制御

Identification and Vibration of Damping of Model and Pedestrian Bridge

日本大学 正社員 塩尻 弘雄
 (株) JIP 大澤 祐太郎
 日本大学 黒岩 雅志
 日本大学 林 植恒

1. 緒言

土木構造物特性の正確な把握は、経済的に損傷を調べるため、または振動抑制のための応答制御に際して状態方程式に基づいて制御系の解析や構築を行う現代制御論においては重要である。

そのため、構造物振動計測からの同定が現実的であると考え、二層モデルと和泉橋南歩道橋を対象に振動を計測し、系の各種同定実験により振動特性（剛性・固有振動数・振動モード・減衰定数）の結果に基づき、効率的な同定法の検討を行った。また、それらの情報のもとに制御を行った。

2. 実験モデル

対象1はFigure 1に示す、ねじれを有する2質点6自由度モデルである。モデルの詳細をFigure 1及びTable 1に示す。

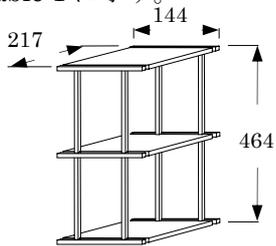


Figure 1: 2層構造モデル

Table 1: モデルの詳細

支柱			
高さ(mm)	幅(mm)	厚さ(mm)	材質
217	5	5	アルミニウム
フロアの重量(kg)			1.35

対象2は写真1に示す、1975年完成の和泉橋南歩道橋、構造は鋼製単純梁で、長さは38.27m、幅員1.5mである。



写真1 和泉橋南歩道橋

3. 実験方法

加速度及び変位計測には、加速度計・レーザー変位計とハイスピードビデオによる動画解析の3種類を用いた。

(1) 2層構造モデル

構造モデルの静的剛性を静的試験治具により求め、その後インパルス振動を与え、固有振動数・減衰定数を算出する。その後、荷重に対する最小二乗法を用い

て剛性を算出する。求めた剛性を初期値とし、変位に対する最小二乗法より再び剛性を算出する。

(2) 泉橋南歩道橋

歩道橋上に各計測装置を設置し、歩道橋の振動に伴う加速度、変位、踏力を計測した。実験装置と設置図をFigure 2、3に示す。

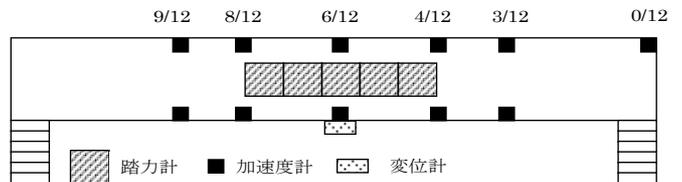


Figure 2: 設置図



a) 加速度計 b) 変位計 c) ハイスピードビデオ

Figure 3: 計測機器

4. アクティブ制御

Figure 4は2層構造モデル最上階に取り付けられた制御用アクチュエータである。

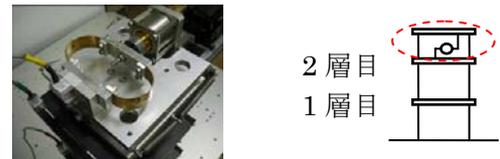


Figure 4: アクチュエータと設置位置

制御システムには、応答の速さと入力の大さきという両者のバランスを考慮して2次形式評価関数を導入し、この評価関数を最小にする最適レギュレータ制御(LQ制御)を用いた。

具体的には、

$$\dot{X} = AX + Bu$$

のような多入力多出力系に対して、次のような2次形式評価関数Jを最小にする状態フィードバックゲイン行列を決定する問題である。

$$J = \int_0^{\infty} [X^T Q X + u^T R u] dt$$

ここで、Qは状態ベクトルにかかる重み行列と呼ばれる非負正定行列である。Rは入力ベクトルにかかる重み行列と呼ばれる正定行列である。このQとRの選択

キーワード 構造同定、ハイスピードビデオ、最小二乗法、歩道橋

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 日本大学理工学部 TEL03-3259-0876

によって応答の速さと入力エネルギーの消費のバランスをとることができる。ここでは、構造物の速度・変位・アクチュエータに流れる電流を状態ベクトル X とした。センサーでは状態ベクトル全てを観測できないため、測定可能な観測値からカルマンフィルタを用いて状態ベクトルを推定する。観測値 y が次式で与えられるとする。

$$Y = CX + v$$

ここで、 C は観測マトリックス、 v は観測誤差ベクトルである。

w 、 v はお互いに相関のない白色雑音で、

$$w = E\{ww^T\}, v = E\{vv^T\}$$

推定値を \hat{X} とすると、次式で与えられる。

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu + L(y - C\hat{X})$$

ここで、 $L = \hat{X}C^T v^{-1} - A\hat{X} + \hat{X}A^T - \hat{X}C^T v^{-1} C\hat{X} + w$ である。

また、制御力 u は $u = -R^T B^T P \hat{X} = -K \hat{X}$ で与えられる。

ただし、 $PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$ である。

アクティブ制御パラメータには、同定実験で求めた値を使用した。

モデルのインパルス実験結果を以下に示す。

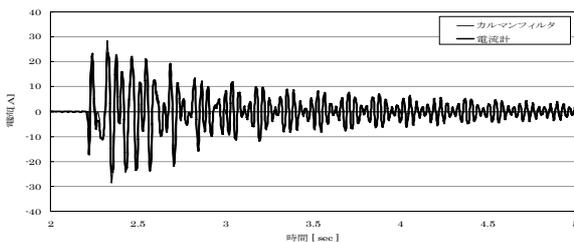


Figure 5: カルマンフィルタ

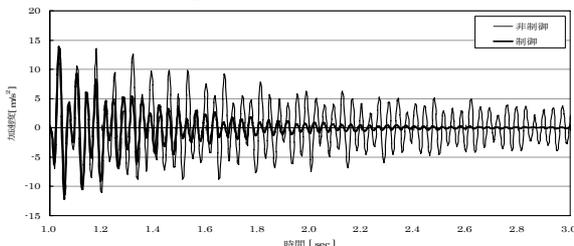


Figure 6: 加速度時刻歴応答

歩道橋のインパルス実験は被験者 (78Kg) が歩道橋上でジャンプをすることでインパルス力を与えた。そのときの、制御有りと非制御時のインパルス力を踏力計から、6/12 地点の加速度応答を加速度計から計測した。それぞれの応答を Figure 7、8 に示す。また、加速度をフーリエ変換した結果を Figure 9 に示す。

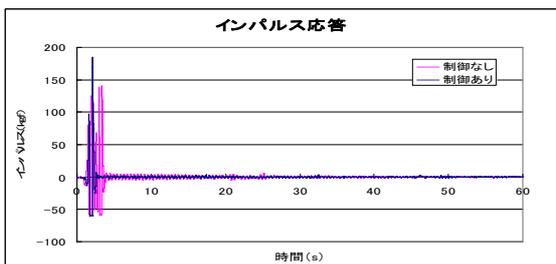


Figure 7 インパルス力

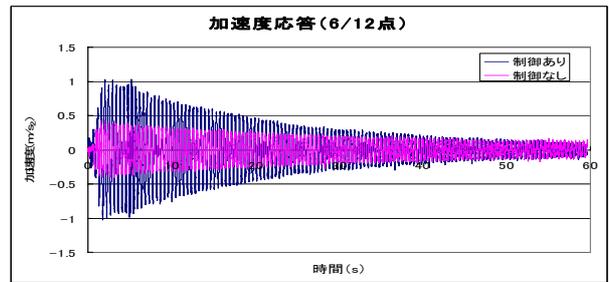


Figure 8 制御結果の比較

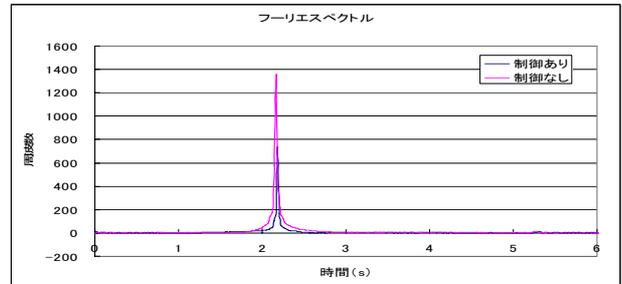


Figure 9 フーリエスペクトルの比較

モデルに制御有りで最大加速度の振幅の減衰時間が大幅の短縮されたことが分かった。カルマンフィルタからの状態ベクトルの推定値はセンサーと一致した。また、歩道橋には、制御有り無しで、歩行踏力にそれほど大きな差は見られないが、6/12 地点の加速度応答を比較すると、制御有りでは制御無しに比べ加速度の減少が確認できる。

8. 結言

モデルと歩道橋の振動制御のため起振実験を行い、各種精度の良いパラメータを得ることができた。

今年度より計測方法として導入したハイスピードカメラを用いた画像解析では、加速度、変位を計測することができた。今後、計測手法として適用拡大が考えられるハイスピードカメラを用いた画像解析手法はオンラインに計測、解析しアクティブ制御に連携させるシステムの構築が望まれる。

アクチュエータを用いたアクティブ制御では、振動の低減を確認し、加速度応答を比較すると加速度の減少が見られる。構造物の速度・変位・アクチュエータに流れる電流を状態ベクトルとし、加速度からカルマンフィルタを用いて状態ベクトルを推定した。推定値とセンサーからの計測値は良好に一致した。インパルス実験において、非制御時と比較して加速度の振幅の減衰時間が大幅の短縮されたことで、アクティブ制御の有効性が確認できた。

謝辞:

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業 (日本大学理工学部)・研究課題「環境防災都市における研究」の一環として実施したものである。