

I - B 488

帯域フィルタを利用した構造物の震動予測制御

筑波大学 学生員 立石 彰
筑波大学 正員 西岡 隆

1. はじめに

構造物の震動制御を行う場合、制御システムには、外乱やシステムの応答をセンサーが感知してからアクチュエーターが作動するまでの時間差が存在する。このような制御時間遅れの問題を解決するために、カルマンフィルタを利用した外乱のリアルタイム予測に関する研究がなされている。しかしながら、予測の対象とする地震波加速度は、一般に自己相関性が低いいため、とくに2ステップ以上先の予測を行う場合には精度が低下するという問題点があった。以上のことを背景に、本研究では、フィードフォワード予測制御を行うことを前提に、外乱の予測精度とともに制御効率の向上を図ることを目的とする。

2. 解析方法

(1) 地震波成分のリアルタイム予測

地震波から特定の周波数帯域の振動成分をリアルタイムに抽出することを目的として、本研究では、バタワースフィルタを利用する。バタワース帯域通過フィルタを時間領域で示すと次式のようになる。

$$y_k = \sum_{i=0}^M a_i x_{k-i} + \sum_{j=1}^M b_j y_{k-j} \quad (1)$$

ここに、 k は時刻、 x_k は観測される地震波、 y_k はフィルタを通過した地震波成分を表し、また、 M 、 a_i 、 b_i はフィルタの通過域を規定する周波数の値とフィルタの次数によって決まる係数を表している。

式(1)によって与えられる地震波成分 $\{y_k\}$ が時変AR過程で表現できるものと仮定し、状態空間モデルを次式のように表す。

$$\begin{cases} [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]^T_k = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]^T_{k-1} \\ y_k = [y_{k-1} \ \cdots \ y_{k-m}] [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]^T_k + v_k \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 m はAR次数、 $[c_1 \ \cdots \ c_m]_k$ は時変AR係数、 v_k は平均0、分散 σ^2 の正規白色ノイズを表す。

式(2)で与えられる状態空間モデルに対して、カルマンフィルタのアルゴリズムは時変AR係数の条件

付き期待値を逐次与える。すなわち、

$$\begin{aligned} & [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]_{k|k-1} \\ & \equiv E \left([c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]_k \middle| y_1, y_2, \dots, y_{k-1} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

これにより、時刻 $k-1$ までの観測データを利用した地震波成分の1ステップ先予測値 $\tilde{y}_k$ は次式によって得ることができる。

$$\tilde{y}_k = [y_{k-1} \ y_{k-2} \ \cdots \ y_{k-m}] [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_m]^T_{k|k-1} \quad (4)$$

(2) フィードフォワード震動予測制御

制御力型制振装置を持つ構造物の運動方程式は、構造物を線形と仮定し自由度を n とした場合、次式のように表される。

$$M\ddot{q}_k + C\dot{q}_k + Kq_k = -M\ddot{x}_k + u_k \quad (5)$$

ここに、 M 、 C 、 K はそれぞれ $n \times n$ 次の質量、減衰、剛性行列を、また、 q_k 、 u_k はそれぞれ $n \times 1$ 次の変位ベクトル、および制御力ベクトルを、 x_k は構造に入力される地震加速度を表す。

本研究では、上式中の制御力ベクトル u_k に対し、前項で示した地震波成分のリアルタイム予測をフィードフォワード制御に適用することを提案する¹⁾。すなわち、システムの制御時間遅れ分だけ未来の制御力を予測し、帯域フィルタの通過域を構造物の固有周波数を含む帯域に設定することによって、外乱の予測精度および制御効率の向上を図るものとする。この場合、制御力ベクトル u_k は次式のように表される。

$$u_k = -G_f M I \tilde{y}_k \quad (6)$$

ただし、 G_f は $n \times n$ 次のフィードフォワードゲインを、 $\tilde{y}_k$ は式(4)で与えられる帯域フィルタを通した地震加速度の予測値を表す。

3. 数値解析と考察

(1) 地震波成分の予測精度に対する検討

はじめに、帯域フィルタを利用した地震波成分のリアルタイム予測の精度について検討を行う。以下の

Key Words: feedforward prediction control, bandpass filter, forward prediction of seismic wave

〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1, Tel : 0298-53-5487, Fax : 0298-53-5207

解析では El Centro 波 NS 成分加速度の最大振幅を $100(\text{cm/s}^2)$ に調整した波を用いるものとする。

図1は予測ステップ数（1ステップ：0.02秒）と振幅誤差の関係について、1(Hz)を中心に帯域フィルタの通過域を変化させて示したものである。ここで、グラフの縦軸は振幅誤差の割合を表し、地震波の全継続時間を通しての振幅誤差の和を、各帯域の正解波形の振幅の大きさの和で基準化した値で示している。この図から、それぞれの結果は予測ステップ数が大きくなるに従い予測精度が低下していくことがわかる。通過域の幅を変化させた場合の各解析結果を比較すると、通過域の幅が小さいほど予測精度が高く、また、予測ステップ数によって精度低下の割合が少ないことがわかる。これは、通過域の幅を大きくすることによって波形が複雑になり、波の自己相関性が低下するためであると考えられる。

(2) 制御効率に対する検討

数値解析によって、前節で導入した帯域フィルタを利用したフィードフォワード震動予測制御の有効性について検討を行う。解析モデルは1自由度1制御力系構造物とし、構造物の質量を60ton、非減衰固有周期を1秒、減衰定数を2%と定める。構造物の非減衰固有周期が1秒であることから、その帯域の地震波を抑えることを目的として、帯域フィルタの通過域は0.7~1.3(Hz)に設定した。解析の指標として、構造物の運動エネルギーとひずみエネルギーの和として定義した振動エネルギーを用いて示すものとする。

図2は、平均制御力と最大振動エネルギー比の関係を示している。ここで、グラフの横軸は外乱作用時間中の制御力の平均値を表し、縦軸はそれぞれケースの解析に対する構造物の振動エネルギーの最大値を、制御力を作用させない場合の結果で基準化した値で表している。すなわち、このグラフは制御力を作用させることによって振動エネルギーが何割に低減するのかを示している。図の(1)は、定常フィードバック制御、(2)は帯域フィルタを利用してフィードフォワード予測制御を行った結果を表している。また、同じ図の中で、制御時間遅れに相当するステップ数を0~7ステップまで変化させた結果をまとめて示した。

これらの図から、定常フィードバック制御に対する各結果は、制御時間遅れを表すステップ数が大きくなるに従い制御効率が低下していくことがわかる。このことは、制震システムの設計を行う際には制御時間

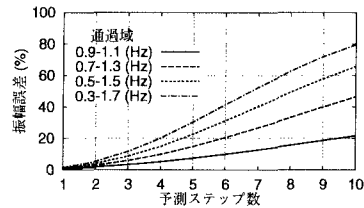


図-1 予測ステップ数と振幅誤差の関係

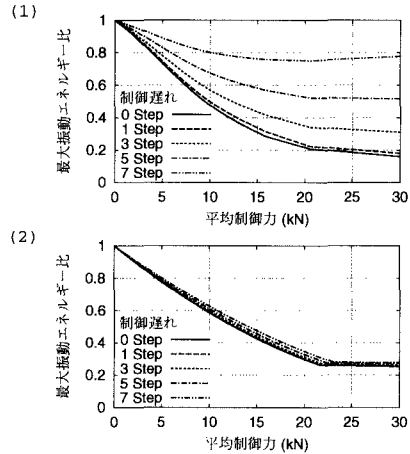


図-2 平均制御力と最大振動エネルギー比の関係

(1) 定常フィードバック制御 (2) 提案手法

遅れの影響を無視できないことを意味している。一方、帯域フィルタを利用したフィードフォワード予測制御に対する結果は、制御時間遅れによる制御効率の低下が比較的小さく、およそ3ステップ以上制御時間遅れが生じてくる場合には定常フィードバック制御に対する結果を上回る制御効果を与えることがわかる。これは、外乱を帯域フィルタに通すことによってリアルタイム予測の精度が向上し、またこの方法により予測ステップ数による精度低下の影響も比較的小さくなるためである。

4. 結論

本研究では、パワースペクトル通過フィルタを利用して地震波成分のリアルタイム予測を行い、そこで得られるデータをもとに構造物のフィードフォワード予測制御を行う方法を示した。数値解析による結果から、本手法は震動制御を行う上で十分に実用的な制御方法となることがわかった。とくに、制御時間遅れの大きい系に対して、本手法はより有効な方法となる。

参考文献

- 1) 立石彰・西岡隆：デジタルフィルタを利用した構造物の震動制御，日本建築学会構造系論文集，投稿中