

# 予測される外乱情報を利用した 建造物の震動制御

立石 彰<sup>1</sup>・西岡 隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 筑波大学大学院システム情報工学研究科 研究生 (〒 305-0006 つくば市天王台 1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 筑波大学教授 機能工学系 (〒 305-0006 つくば市天王台 1-1-1)

制御時間中にリアルタイムに予測される地震波の入力情報を有効に利用した震動制御則の提案を行った。本制御則は従来の最適レギュレータ理論を拡張させることによって得られ、定常フィードバック制御項と入力外乱の予測情報を含んだフィードフォワード制御項で構成される。1自由度1制御力系モデルでのシミュレーション解析により、制御則の周波数領域での基本的な特徴について考察を行うとともに、定常フィードバック制御との制御効率の比較から本手法の有効性を検討する。

**Key Words** : *active seismic prediction control, closed-open-loop control, information on predicted external force, transfer function, control efficiency*

## 1. はじめに

近年の制振技術の発展は、建造物の安全性と居住性を向上させ、超高層ビルや長大橋の建設に貢献した。現在、建設分野で応用されている制振構造は、外部からのエネルギーの供給を必要としないパッシブ型のものが主流となっているが、制御理論および周辺技術の発展に伴いアクティブ型の構造に対しても関心が持たれるようになってきた。アクティブ型の制振構造は、システムの外部からアクチュエータへのエネルギーの供給を必要とすることや装置の作成や維持にかかるコストの面で不利な要素を含んでいるが、制振性能を大きく向上させる可能性を有しており、今後の周辺技術のさらなる発展により、建設の機会が増していくものと思われる。

アクティブ型制振構造の研究では、建造物への入力外乱に対して応答を効率的に低減させるための制御入力をどのように定めるか、という制御則の決定方法が一つの重要な課題となる。この分野での多くの研究の基礎となっているのは最適制御理論で、通常建造物の応答成分を要素とする状態量と制御入力で構成される二次形式の評価関数を設定し、系の状態方程式のもとでこの関数を最小にするための条件として最適な制御入力が求められる。しかしながら、この方法の誘導の過程で得られるリカッチ方程式は、一般には外乱が既知でなければ解けない二点境界値問題を構成するため、従来は外乱に依存するフィードフォワード項を制御則中で考慮することが困難であった。それに対し、フィードフォワード項を制御則中で適切に評価することにより、制御効率をより向上させる試みが多くの研究でなされている。J.N.Yang

ら<sup>1)</sup>は時間依存型の評価関数を導入し、制御を行う各時刻で評価関数の最適化を行う瞬間最適制御を提案し、制御則中にフィードフォワード項を含める方法を示した。佐藤ら<sup>2)</sup>はJ.N.Yangらの瞬間最適制御を改良し、二次形式の評価関数に外乱のエネルギー項を加えることにより、外乱の特性を制御則中に反映させる方法を示した。また、奈良岡・勝倉<sup>3),4)</sup>は閉ループ型制御の制御効率について考察し、フィードバック制御力とフィードフォワード制御力の組合せにより、フィードバック制御を単独で行う場合よりも制御効率が向上することを示している。

制御効率の向上について取り組んだ他の研究では、外乱やシステムの応答をセンサーで感知してからアクチュエータで制御力が作用するまでの間に発生する制御時間遅れを考慮に入れ、より現実的なアルゴリズムの構築を目指したものもある<sup>5)~7)</sup>。佐藤ら<sup>8)</sup>はカルマンフィルタの予測アルゴリズムを地震加速度に対して適用することで、制御時間遅れを考慮した評価関数の構築を行った。齊藤・星谷<sup>9)</sup>は地震加速度のリアルタイム予測に対してカルマンフィルタおよび初期値の設定に工夫を加えることによって予測精度の向上を図り、それを瞬間最適制御で適用した。また、筆者ら<sup>10)</sup>はデジタルフィルタを通して得られる地震加速度の振動成分に対してカルマンフィルタでリアルタイム予測を行い、フィードフォワード制御系で良好な成果を得ている。これらの制御則は、一般にアルゴリズム中で時系列の予測モデルを利用することにより制御を行う時刻での外乱やシステムの応答を予測し、制御時間遅れによって生じる制御効率の低下を抑えることを目的としたものである。しかし

ながら、これら方法は制御遅れ時間分の予測データをもとに制御入力算出が行われるため、それよりも長期の予測データが得られる場合においても、その情報を制御則中で有効に利用することができなかった。

ところで、機械系制御分野では、システムへの外乱や応答の目標値が既知である場合に対し、その情報を利用した予見制御の研究がなされている<sup>11)~13)</sup>。これらの研究では、予見制御の特徴として、目標値への追従性が良いことや制御に要するエネルギーが少なく済むことが示されている。予見制御を土木構造物の制震問題へ応用する場合、システムへの外乱が未知であることが大きな問題となるが、予見制御の持つエネルギー消費が少ないという特徴は、とくに規模の大きな構造物を制御の対象とする建設分野での問題では大きな魅力となる。

以上のことを背景に、本研究では、構造物の震動制御に予見制御を応用した新たな制御則の提案を行うことを目的とする。地震波の予測には、時変 AR モデルにカルマンフィルタを適用したリアルタイム予測法を用い、予測される外乱情報を制御則中で有効に利用する方法を示す。従来の予測制御との違いは、制御を行う時刻での外乱情報を予測するのではなく、それよりも長期の予測データを制御則中で積極的に利用して、制御効率の向上を図っている点にある。解析例を通して本手法の特徴について考察するとともに、従来の制御方法と制御効率の比較を行うことによりその有効性を示す。

## 2. 外乱予測制御

この節では、制御時間中に数ステップ先までの外乱の予測値が得られることを仮定し、その情報を制御則中で有効に利用する方法について説明する。はじめに、外乱予測制御則の提案を行い、この方法が従来の最適レギュレータ理論に基づく制御則を拡張させることによって得られることを示す。つぎに、この制御系の周波数特性を検討するために必要となる伝達関数の誘導を行う。

### (1) 制御則の導出

アクティブ型制震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  $n$ 、制御装置の数を  $m$  とすれば、次式のように表すことができる。

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) + Su(t) \quad (1)$$

ここに、 $q(t)$ 、 $f(t)$ 、 $u(t)$  はそれぞれ時刻  $t$  における  $n \times 1$  次の変位、外乱ベクトル、および  $m \times 1$  次の制御入力ベクトルを、 $M$ 、 $C$ 、 $K$  は  $n \times n$  次の質量、減衰、剛性マトリクスを、また、 $S$  は制御装置で発生した力が構造物にどのように配分されるかを示す  $n \times m$  次の制御入力位置マトリクスを表す。

上式を離散時間系の状態方程式で表すと次式のようになる。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Df(k) \quad (2)$$

ここに

$$\begin{aligned} x(k) &= [q^T(k) \quad \dot{q}^T(k)]^T \\ A &= E + (A_c\Delta) + \dots + \frac{(A_c\Delta)^n}{n!} + \dots \\ B &= \Delta \left[ E + \frac{(A_c\Delta)}{2!} + \dots + \frac{(A_c\Delta)^n}{(n+1)!} + \dots \right] B_c \\ D &= \Delta \left[ E + \frac{(A_c\Delta)}{2!} + \dots + \frac{(A_c\Delta)^n}{(n+1)!} + \dots \right] D_c \\ A_c &= \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ E & O \end{bmatrix} \\ B_c &= \begin{bmatrix} M^{-1}S \\ O \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} M^{-1} \\ O \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ただし、 $k$  は離散時間系の時刻、 $\Delta$  は時間刻み、 $E$  は単位行列を表す。

現在、この分野で最も一般的に用いられている最適レギュレータ理論に基づく制御則は、式(2)の状態方程式に対し、状態量と制御入力の2次形式で表現される評価関数を最小とする条件をもとに決定がなされる。すなわち、一般的な評価関数は、

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (3)$$

ここに、 $Q$  および  $R$  は、それぞれ  $2n \times 2n$  次の状態量に対する重み行列、および  $m \times m$  次の制御入力に対する重み行列を表す。

式(2)および(3)に対し、ラグランジェの未定乗数法を適用して  $u(k)$  を求めると、最終的に系に最適な制御則として次式が得られる。

$$u(k) = G_b x(k) \quad (4)$$

$$G_b = -[R + B^T P B]^{-1} B^T P A \quad (5)$$

ただし、 $G_b$  は  $m \times 2n$  次の定常フィードバックゲイン、 $P$  は次式で与えられる定常 Riccati 方程式の解を表す。

$$\begin{aligned} P &= Q + A^T P A \\ &\quad - A^T P B [R + B^T P B]^{-1} B^T P A \quad (6) \end{aligned}$$

いま、ここでの制御系において、現在から  $N$  ステップ先までの外乱が予測できたとする。式(3)に示した評価関数は制御の開始時刻を  $k=1$  としたものであるが、 $N$  ステップ先の外乱が予測できる場合には  $k=-N+1$  の時点で外乱を知ることができ、その情報をもとに制御を開始することが可能である。

すなわち、 $N$  ステップ先までの未来情報を考慮した評価関数は次式のようになる。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=-N+1}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (7)$$

式 (7) の評価関数に対する最適化問題を解くにあたり、求める解として制御入力  $u(k)$  を次式のように仮定する。

$$u(k) = G_b x(k) + \sum_{j=0}^N G_f(j) f(k+j) \quad (8)$$

ただし、上式におけるフィードバックゲイン  $G_b$  は、先に示した定常フィードバック制御の場合と同様、式 (5) によって与えるものとする。また、 $G_f(j)$  はステップ数  $j$  によって変化する  $m \times n$  次のフィードフォワードゲインを表す。

系に作用する外乱として、次式を想定する。

$$f(k) = f_0 \delta(k-1) \quad (9)$$

ここに、 $\delta(k)$  は Dirac のデルタ関数、 $f_0$  は外乱の大きさを表す。

このような外乱を設定するのは、ある時刻に作用する外乱のみに着目し、その外乱による評価関数の値の低減を考えるためである。対象とする系は線形であることから、ここでの仮定は、最終的に一般の外乱をパルス列の集合として扱うことと同等の意味を持つ。

想定する外乱の性質をもとに、式 (8) を式 (2) に代入すると、状態方程式は各時刻において以下の関係が成立する。

$$x(-N+2) = BG_f(N) f_0 \quad (10)$$

$$x(-N+3) = [\xi BG_f(N) + BG_f(N-1)] f_0 \quad (11)$$

⋮

$$x(1) = [\xi^{N-1} BG_f(N) + \xi^{N-2} BG_f(N-1) + \dots + BG_f(1)] f_0 \quad (12)$$

$$x(2) = [\xi^N BG_f(N) + \xi^{N-1} BG_f(N-1) + \dots + \xi BG_f(1) + [D + BG_f(0)]] f_0 \quad (13)$$

$$x(k+1) = \xi^{k-1} x(2) \quad (k \geq 2) \quad (14)$$

ただし

$$\xi = A + BG_b \quad (15)$$

各時刻における状態方程式 (10) から (14) の関係を考慮し、式 (8) を式 (7) に代入し整理すると、評価関数は次式のようになる。

$$J = \frac{1}{2} f_0^T \left[ G_{ff}^T \Gamma_{ff} G_{ff} + 2G_{ff}^T \Delta_{ff} + D^T PD \right] f_0 \quad (16)$$

ここに

$$G_{ff} = \begin{bmatrix} G_f(0) \\ G_f(1) \\ \vdots \\ G_f(N) \end{bmatrix}, \quad \Delta_{ff} = \begin{bmatrix} B^T PD \\ B^T \xi^T PD \\ \vdots \\ B^T (\xi^T)^N PD \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_{ff} = \begin{bmatrix} R + B^T PB & & & O \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ O & & & R + B^T PB \end{bmatrix}$$

式 (16) の評価関数に含まれる未知数はフィードフォワードゲイン  $G_f(j)$  であることから、式 (16) を  $G_{ff}$  で偏微分すると、

$$\frac{\partial J}{\partial G_{ff} f_0} = [\Gamma_{ff} G_{ff} + \Delta_{ff}] f_0 \quad (17)$$

すなわち、評価関数を最小にするゲイン行列  $G_{ff}$  は次式のようになる。

$$G_{ff} = -\Gamma_{ff}^{-1} \Delta_{ff} \quad (18)$$

以上により、フィードフォワードゲイン  $G_f(j)$  として次式が得られる。

$$G_f(j) = -[R + B^T PB]^{-1} B^T (\xi^T)^{j-1} PD \quad (j \geq 0) \quad (19)$$

予測制御則を与える式 (8) からわかるように、本手法は閉ループ型の制御則であり、従来の定常フィードバック制御則にフィードフォワード制御項を付加することによって与えられる。すなわち、従来の手法に対して制御則の拡張が容易である。一般的な閉ループ型の制御則との違いは、制御則中に未来の時刻の外乱予測項  $f(k+j)$  ( $j \geq 1$  の場合) が含まれている点である。式 (8) は、もしも何ステップか先までの未来の外乱情報を予測することができれば、本手法によってその情報を有効に利用できることを示している。

## (2) 制御系の伝達関数

ここでは、先に示した予測制御システムについて、状態量および制御入力に関する伝達関数の誘導を行う。

系の状態方程式 (2) に式 (8) の予測制御則を代入し、その両辺を  $z$  変換すると次式が得られる。

$$zX(z) = \xi X(z) + B \sum_{j=0}^N z^j G_f(j) F(z) + DF(z) \quad (20)$$

ここに、 $X(z)$ 、 $F(z)$  は、それぞれ  $x(k)$  および  $f(k)$  の  $z$  変換を表している。

上式を整理することにより、 $z$  領域における系の状態量と外乱の関係を与える次式が得られる。

$$X(z) = H_s(z) F(z) \quad (21)$$

$$H_s(z) = [zE - \xi]^{-1} \left[ B \sum_{j=0}^N z^j G_f(j) + D \right] \quad (22)$$

ここに、 $E$  は  $2n \times 2n$  次の単位行列を、 $H_s(z)$  は  $2n \times n$  次の状態量に関する伝達関数を表している。

一方、 $z$  領域における制御入力と外乱の関係は、式 (8) の両辺を  $z$  変換し、式 (21) の関係を用いて式を展開す

ることにより、次式のように求められる。

$$U(z) = H_c(z)F(z) \quad (23)$$

$$H_c(z) = G_b H_s(z) + \sum_{j=0}^N z^j G_f(j) \quad (24)$$

ここに、 $U(z)$  は  $u(k)$  の  $z$  変換、 $H_c(z)$  は  $2n \times n$  次の制御入力に関する伝達関数を表している。

なお、定常フィードバック制御に対する伝達関数は、式(22)および(24)に対して、 $G_f(j)$  に  $O$  を代入したケースとして与えられる。

### 3. 数値解析と考察

この節では、数値解析によって、前節で提案した予測制御システムの特徴および有効性について検討を行う。最適レギュレータ理論から得られる定常フィードバック制御との結果の比較を行うことにより、本手法の制御特性を明らかにする。

#### (1) 解析モデル

解析モデルは、本手法の基本的な特性と効果を明確に示す目的から、最も単純な 1 自由度 1 制御力系構造物を用いた。モデルの諸元は図-1 の中の表に示されている通りで、非減衰固有周期を 1 秒、減衰定数を 2% とした。入力地震波には El Centro 波 NS 成分、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波 NS 成分、および Taft 波 EW 成分を用いる。それぞれの地震波は加速度の最大振幅を  $1 \text{ m/s}^2$  に調整し、時間刻みを 0.01 秒、継続時間を 30 秒として与えた。

本手法および比較の対象とする定常フィードバック制御において、評価関数に含まれる状態量に対する重み行列  $Q$  は次式のように設定した。

$$Q = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad (25)$$

このように置くと、評価関数中で  $Q$  を含む項は、システムの運動エネルギーとひずみエネルギーの和を表すことになる。制御力の大きさの調整は、制御入力に対する重み  $R$  の値を変化させることにより行うものとし、 $R$  は  $10^{-8} \sim 10^{-3}$  の範囲で与えた。

予測制御を行う場合には、制御を行う各時刻で  $N$  ステップ先までの外乱の予測値を得る必要がある。ここでは外乱の予測値をリアルタイムに得る方法として、佐藤等によって提案されたカルマンフィルタを利用した時系列の予測法を用いる。すなわち、構造物への入力地震加速度が時変 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定めた。

$$\begin{cases} [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_k = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_{k-1} \\ y_k = [y_{k-1} \ \dots \ y_{k-l}] [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_k + v \end{cases} \quad (26)$$

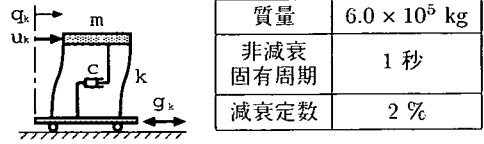


図-1 解析モデルとモデルの諸元

表-1 時系列の予測パラメータ

AR 次数 $l$	5
AR 係数の初期値	$[1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ ( $l \times 1$ 次元)
観測ノイズの共分散	0.1
AR 係数の条件付き共分散行列の初期値	$0.1E$ ( $E: l \times l$ 次の単位行列)

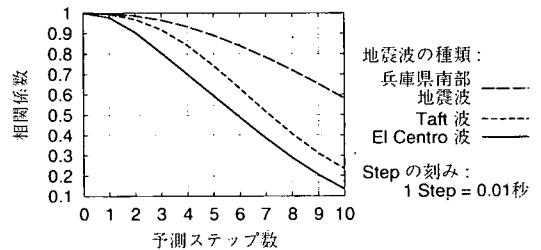


図-2 地震波の予測精度 (予測ステップ数と相関係数の関係)

ここに、 $y_k$  と  $[a_1 \ \dots \ a_l]_k$  は、それぞれ時刻  $k$  での地震加速度および時変 AR 係数、 $l$  は AR 次数、 $v$  は平均 0、分散  $\sigma^2$  の正規白色ノイズを表す。

式(26)をカルマンフィルタのアルゴリズムに適用することにより、各時刻において時変 AR 係数の条件付き期待値と共分散行列の予測値が得られ、時刻  $k$  で予測される時変 AR 係数の条件付き期待値は次式のようになる。

$$\begin{aligned} & [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]_{k+1|k} \\ & = E([a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]_{k+1} | y_1, y_2, \dots, y_k) \end{aligned} \quad (27)$$

これにより、時刻  $k$  での地震加速度の 1 ステップ先予測値  $\tilde{y}_{k+1}$  は次式のように求められる。

$$\tilde{y}_{k+1} = [y_k \ y_{k-1} \ \dots \ y_{k-l+1}] [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]_{k+1|k}^T \quad (28)$$

2 ステップ以上先の予測値は繰り返し代入法を用いて求めるものとする。すなわち、式(28)から得られる 1 ステップ先の予測値が正解であると仮定し、その予測値を観測値と同様に扱うことよって次のステップの予測値を求め、以下これを目的のステップまで順次繰り返していく。これにより、2 ステップ以上先の予測値  $\tilde{y}_{k+2}$ ,

$\tilde{y}_{k+3}, \dots$  は次式のように求められる.

$$\begin{aligned}\tilde{y}_{k+2} &= [\tilde{y}_{k+1} \ y_k \ \dots \ y_{k-l+1}] [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_{k+2|k+1} \\ \tilde{y}_{k+3} &= [\tilde{y}_{k+2} \ \tilde{y}_{k+1} \ y_k \ \dots \ y_{k-l+1}] [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_{k+3|k+2} \\ &\vdots \\ \tilde{y}_{k+N} &= [\tilde{y}_{k+N-1} \ \tilde{y}_{k+N-2} \ \dots] [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]^T_{k+N|k+N-1}\end{aligned}\quad (29)$$

ただし、式(29)において、時変 AR 係数の条件付き期待値は次式で与える.

$$\begin{aligned}[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]_{k+j|k+j-1} \\ = E([a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l]_{k+j} | y_1, \dots, y_k, \tilde{y}_{k+1}, \dots, \tilde{y}_{k+j-1}) \\ (j \geq 2)\end{aligned}\quad (30)$$

ここでこの解析では、時系列の予測パラメータとして表-1の値を用いた。これらは事前解析によって定めた値で、この節で扱う地震波、および他の代表的な地震波に対しても比較的安定した予測結果を与える。

図-2に、ここで説明した方法によって得られた各地震波の予測精度を示す。グラフの横軸は予測ステップ数を、縦軸は実際の地震波と予測された波との相関係数を表す。それぞれの地震波に対する解析から、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ものの、比較的小さなステップ数での予測であれば、精度の高い結果が得られることがわかる。

## (2) フィードフォワード項に関する考察

ここでは、本制御則の特徴であるフィードフォワード項についての考察を行う。

図-3は、式(19)で与えられるフィードフォワードゲイン  $G_f(j)$  の値を、ステップ数  $j$  および重み係数  $R$  を変化させて示したものである。式(8)のフィードフォワード項の形からわかるように、フィードフォワードゲインの値は外乱の予測情報に対する重みと見なすことができる。図-3の結果より、ゲインの大きさはステップ数  $j$  および重み係数  $R$  の値によって変化するが、いずれの結果も構造物の固有周期と同じ 1 秒周期 (100 Step) の波を形成し、ステップ数が大きくなるに従いグラフは減衰していくことがわかる。このことは、外乱予測制御を行う場合、近い将来の外乱の予測値は有用な情報となるが、現在からある程度遠い将来の予測情報はあまり有用でなくなることを意味している。

図-4は、入力地震波として El Centro 波を与えた場合のフィードフォワード制御力の精度を、予測ステップ数および重み係数  $R$  の値を変化させて示したものである。フィードフォワード制御力は式中に外乱の予測項が含まれるため、外乱の予測精度によって誤差を含むことになる。グラフの縦軸には、フィードフォワード制御力の精度を表す指標として相関係数を用いた。すなわ

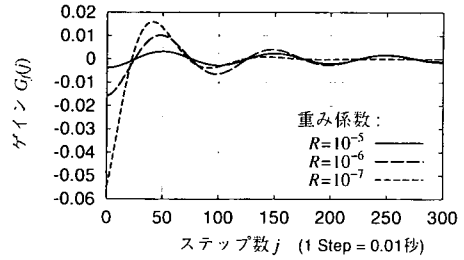


図-3 フィードフォワードゲイン  $G_f(j)$

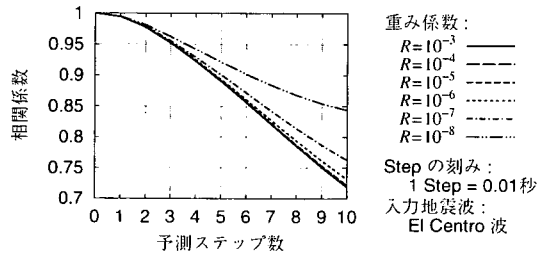


図-4 フィードフォワード制御力の精度 (予測ステップ数と相関係数の関係)

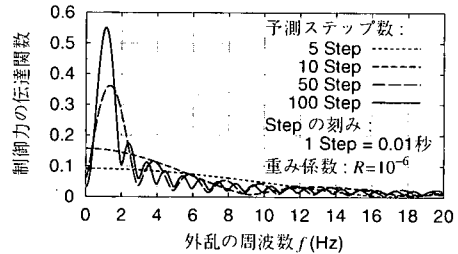


図-5 フィードフォワード制御力に対する伝達関数の振幅特性

ち、外乱の予測値として実際の地震波を与えた場合の制御力と、外乱の予測値から算出された制御力との相関係数を表している。結果より、予測ステップ数が大きくなると、地震波の予測精度の影響により制御力に誤差を含む割合が高くなるが、図-2に示した El Centro 波の予測精度の結果と比較すると、精度の低下は小さいことがわかる。これは図-3で説明したように、ステップ数によってゲイン  $G_f(j)$  の値が変化し、先の外乱の予測情報に対する重みが小さくなるためである。また、重み係数  $R$  の値が小さくなると、ゲインの減衰が大きくなるため制御力の精度は高くなる。このことは、重み係数  $R$  の値を小さく、すなわち制御力を大きく設定する場合には、比較的高い精度の制御力が得られることを意味している。

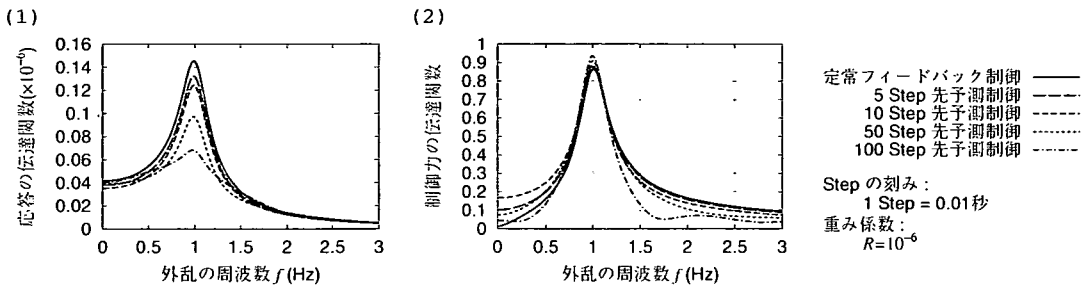


図-6 伝達関数の振幅特性 (ステップ数  $j$  を変化させた場合)  
 (1) 変位応答に対する伝達関数 (2) 制御力に対する伝達関数

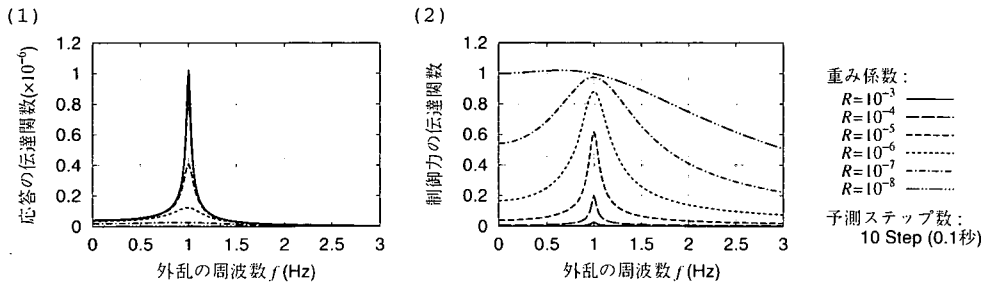


図-7 伝達関数の振幅特性 (重み係数  $R$  を変化させた場合)  
 (1) 変位応答に対する伝達関数 (2) 制御力に対する伝達関数

図-5 は、式 (24) の右辺第 2 項で与えられるフィードフォワード制御力に対する伝達関数の振幅特性を表している。ただし、式の中の変数  $z$  は  $e^{i2\pi f\Delta}$  ( $i$  は虚数単位) に置き換えを行い、周波数  $f$  を変数とする関数で与えた。式の形からわかるように、フィードフォワード制御力に対する伝達関数は FIR フィルタ<sup>14)</sup>と同様の性質を持っている。図-5 の結果からわかるように、伝達関数の形はステップ数によって変化し、ステップ数が大きくなるほど構造物の固有振動数である 1 (Hz) 付近の振動成分を抽出するバンドパスフィルタとしての性質が強く表れる。この性質は、図-3 に示したフィードフォワードゲインのインパルス応答の周期が 1 秒であることに対応している。フィードフォワード制御力は、フィルタで抽出された構造物の固有周波数を含む帯域の外乱の振動成分で構成され、その振動成分を抑えるバンドストップフィルタとしての役割を担っていることがわかる。

### (3) 周波数特性に関する検討

ここでは、式 (22) および (24) に示した伝達関数をもとに、周波数領域での制御則の特徴について考察を行う。ここでの解析は外乱の予測が正確に行われたものと仮定し、理想的な制御状態のもとで周波数特性の把握

を行うものとする。また、前項での解析と同様、式の中の変数  $z$  は  $e^{i2\pi f\Delta}$  に置き換えを行い、伝達関数の絶対値をとった振幅特性を用いて結果を表す。

図-6、図-7 は、それぞれステップ数  $j$  を変化させた場合、および重み係数  $R$  変化させた場合の伝達関数の振幅特性を表している。各図の (1) は式 (22) で与えられる伝達関数のうち、変位応答に関する成分を示したものの、(2) は式 (24) で与えられる制御力に対する伝達関数を示したものである。図-6 では重み係数  $R$  の値を  $10^{-6}$  に設定し、参考として同じ図の中で定常フィードバック制御に対する結果を併せて示した。また、図-7 では予測ステップ数を 10 と設定して結果を与えた。

図-6 および図-7 の (1) の結果より、本制御則は構造物の固有周波数である 1 (Hz) を中心に変位応答を変化させる特徴を持つことがわかる。すなわち、予測ステップ数を大きく与えること、もしくは重み係数  $R$  の値を小さく設定することによって、構造物の固有周波数を中心とする帯域で変位応答が低減される。ここでの結果から、予測ステップ数および重み係数  $R$  は、構造物の変位応答の周波数特性に対して、互いに同様の制御効果を与えるパラメータであることがわかる。

一方、制御力の周波数特性は、図-6 および図-7 の (2) の結果から、パラメータによってグラフの変化の傾向が

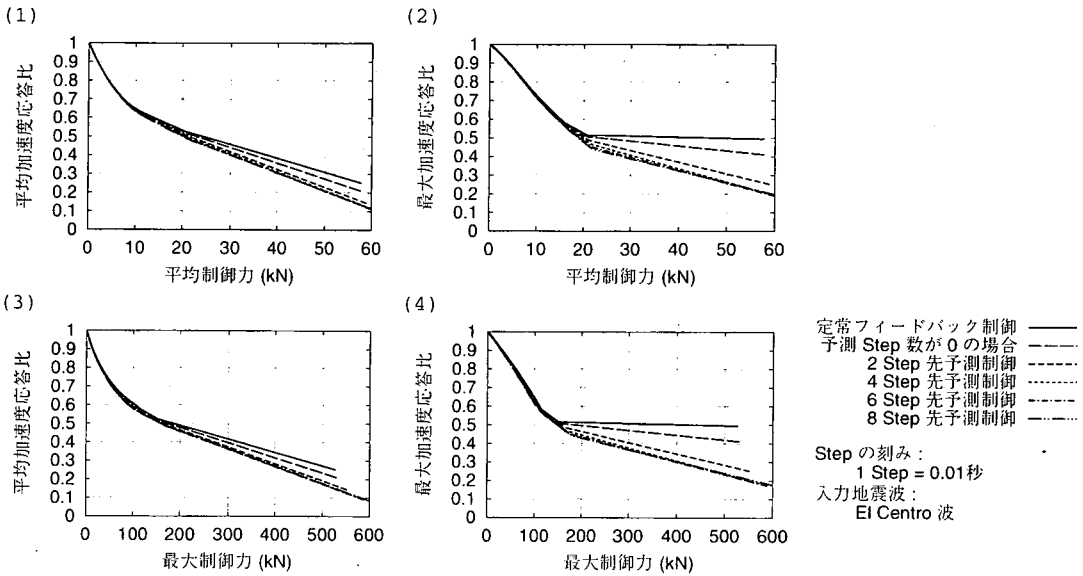


図-8 制御効率 (定常フィードバック制御と本手法の比較)  
 (1) 平均制御力と平均加速度応答比の関係 (2) 平均制御力と最大加速度応答比の関係  
 (3) 最大制御力と平均加速度応答比の関係 (4) 最大制御力と最大加速度応答比の関係

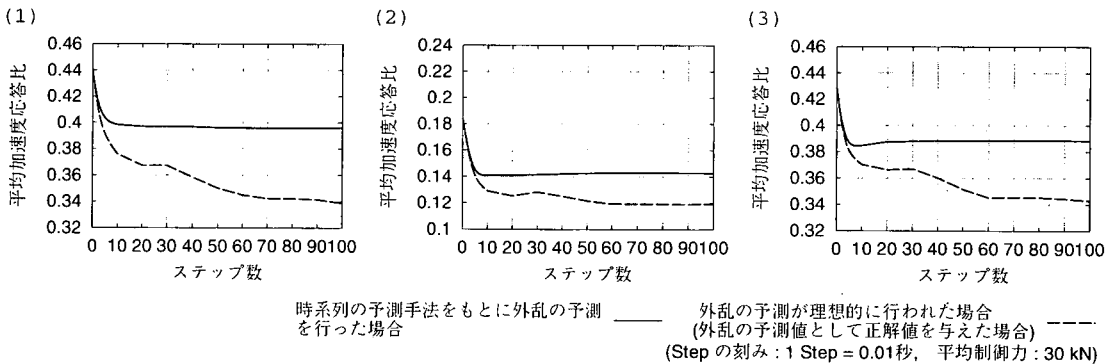


図-9 各地震波に対する本手法の制御効率 (予測ステップ数と平均加速度応答比の関係; 理想的な制御と実際の制御の比較)  
 入力地震波の種類: (1) El Centro 波 (2) 兵庫県南部地震波 (3) Taft 波

それぞれ異なっていることがわかる。すなわち、予測ステップ数の変化は、主に制御力を構成する振動成分の周波数帯域の幅に影響を与え、予測ステップ数を大きく設定することにより、構造物の固有周波数を中心とした狭帯域の振動成分から構成される制御力を得ることができる。また、重み係数  $R$  の変化は制御力の振動成分の大きさに影響を与える。ここでの結果から、予測ステップ数は主に制御効率に関わるパラメータとなり、また重み係数  $R$  は制御力の大きさを決定するパラメータとなることがわかる。

#### (4) 制御効率に関する検討

はじめに、外乱予測制御と定常フィードバック制御との制御効率の比較を行う。解析では、制御入力のおよび本手法に対しては外乱の予測ステップ数をパラメータとし、各ケースに対する地震応答計算から構造物の応答加速度の最大値もしくは平均値を求め、パラメータがそれらの指標に与える影響について検討を行う。

図-8 は、El Centro 波を入力地震波とした場合の本手法および定常フィードバック制御の制御効率を示したグラフで、図の(1)~(4)は、それぞれ、平均制御力と平均加速度応答比の関係、平均制御力と最大加速度応答

比の関係、最大制御力と平均加速度応答比の関係、および最大制御力と最大加速度応答比の関係を表している。ここで、グラフの横軸を与える平均制御力と最大制御力は、外乱の作用時間を通しての制御入力の大さきの平均値および最大値を表す。また、グラフの縦軸を与える平均加速度応答比と最大加速度応答比は、各制御力での解析で求まる応答加速度の平均値と最大値に対し、それぞれ制御力を作用させない場合の結果で規準化した値で表している。すなわち、これらのグラフは、無制御時の構造物の応答加速度の大きさを基準とし、制御力を作用させることによって応答加速度が何割に低減するのかを示している。それぞれの解析に対し、同じグラフの中で、定常フィードバック制御に対する結果、および予測ステップ数を0~8までの間で変化させた本手法の結果を併せて示した。予測ステップ数が0の場合は、本制御則を与える式(8)において、 $N$ に0を代入したことに相当する。すなわち、外乱の予測情報を用いず、現時刻の情報のみを利用して閉ループ型制御を行ったことを意味している。

図-8(1),(2)の結果より、平均制御力がおよそ15(kN)以上の場合において、また、(3),(4)の結果より最大制御力がおよそ150(kN)以上の場合において、それぞれの指標で本手法は定常フィードバック制御を大きく上回る制御効果を与えることがわかる。これらの結果は、本制御則は、比較的大きな制御入力で与えられる系に対して、より効果的に機能することを示している。本手法は、予測ステップ数が0の場合でも定常フィードバック制御を上回る結果を与えるが、とくに予測ステップ数を増すことにより制御効率はさらに向上する。これは、前項で説明したように、予測ステップ数を増すことにより、制御力を構成する振動成分の周波数帯域の幅が狭くなり、構造物の固有周波数帯域の応答を制御する性質がより強く現れるためである。ただし、予測ステップ数がおよそ6以上になると、外乱の予測精度の低下の影響が表れるため、制御効果が停滞する結果となる。

つぎに、外乱の予測ステップ数と制御効率の関係について検討を行う。図-9は、予測ステップ数と平均加速度応答比の関係を示したグラフで、図の(1)~(3)は、それぞれ、入力地震波としてEl Centro波、兵庫県南部地震波、およびTaft波を与えた場合の結果を表している。ここでは、予測ステップ数を0~100までの間で変化させ、それぞれの予測ステップ数で平均制御力が30(kN)となる状態を設定して結果を与えた。各図において、実線のグラフは外乱のリアルタイム予測値を用いて震動制御を行った結果、また、破線は参考として示したグラフで、外乱の予測値として正解値を与えた場合の結果を表している。すなわち、破線のグラフは理想的な制御状態で得られる結果で、本制御則の極限の性能を与えるもの

のと考えられる。

図-9(1)~(3)の結果より、外乱のリアルタイム予測値を用いて震動制御を行った場合は、外乱の予測誤差の影響のため、理想状態よりも制御効率が低下していることがわかる。それぞれの結果は、予測ステップ数を増していくとグラフが平衡し、それ以上予測ステップ数を増しても制御効率が向上しない状態に達する。各地震波に対する結果とも、制御効率が平衡状態となる予測ステップ数は、外乱の予測値をもとに制御を行った場合で7~10ステップ程度、理想的に制御が行われた場合で70ステップ程度。また、外乱の予測精度による制御効率の低下はおよそ15%であることがわかる。このことは、外乱の予測値が正確に得られる場合でも、震動制御で有効に利用できる外乱の予測情報は70ステップ程度であり、それ以上長期の予測情報はほとんど必要とならないことを示している。また、外乱のリアルタイム予測値を用いて震動制御を行う場合は、予測ステップ数が大きくなるほど外乱の予測精度が低下するため、理想状態での制御と比較して有効に利用できる予測情報のステップ数が小さい。ただし、予測ステップ数を大きく設定しても制御効率の低下がほとんど見られないのは、3.(2)で説明したように、制御則中でステップ数の大きな外乱の予測値に対する重みが小さく設定されるためであると考えられる。

この節では、本制御則の基礎的な特性を明確にするため、1自由度1制御力系での考察を行ったが、式(8)をもとに多自由度多制御力系への応用も同様に行うことができる。この場合、制御効率に関わる要素として、制御則を構成するパラメータの与え方が問題となる。ただし、定常フィードバック制御と比較した場合、本制御則を適用することによって増えるパラメータは、系の自由度によらず、外乱のステップ $N$ および外乱の予測定数のみである。これらのパラメータに関わる地震波のリアルタイム予測は、一般に解析の対象とする波の自己相関性が低いため、長期の予測を行うことは困難であるが、近い将来の予測であれば、カルマンフィルタを利用した時系列の予測法等を用いることにより比較的高い精度で予測値を得ることが可能である。ここでの解析結果は、本手法を用いることにより、比較的近い将来の外乱の予測情報に対してもその情報を有効に利用することができ、それにより、より高い効率で震動制御が行えることを示している。

#### 4. 結論

本研究では、外乱の作用時間中にリアルタイムに予測される未来の入力情報を利用して震動制御を行う方法を示した。ここで提案した制御則は閉ループ型で表



され、従来の定常フィードバック制御則に外乱の予測情報を含んだフィードフォワード項を付加することによって与えられる。本制御則の性質および有効性を調べるため、1自由度1制御力系モデルでのシミュレーション解析により検討を行った。

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 制御則の周波数特性に関する検討から、フィードフォワード制御力は構造物の固有周波数を中心とする帯域の振動成分から構成され、入力外乱に対して、その帯域の振動成分を制御するバンドストップフィルタとしての働きを持つことがわかった。フィルタの帯域および性能は外乱の予測ステップ数によって変化し、ステップ数が大きくなるほどバンドストップフィルタとしての性質が強くなる。
- (2) リアルタイムに予測される外乱情報を利用することにより、制御効率を大きく向上させることができる。定常フィードバック制御との制御効率の比較から、本手法は震動制御を行う上でより有効な方法となることが明らかとなった。また、外乱の予測値が得られない場合にも、本制御則をもとに現時刻の情報のみを利用して閉ループ型制御を行うことにより、高い効率で制震を行うことができる。
- (3) 制御則中の外乱の予測ステップ数を増すことにより、制御効率をある程度まで向上させることができる。地震波のリアルタイム予測手法として、時変ARモデルにカルマンフィルタを適用する方法を用いた場合、外乱の予測ステップ数を7~10程度に設定することにより、本手法の最大の制御効果を得ることができた。

## 参考文献

- 1) Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P.: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol.113, No.9, pp.1369~1386, Sep. 1987.
- 2) Sato, T., Toki, K. and Sugiyama, K.: Optimal Control of Seismic Response of Structure. *Proceedings of JSCE*, Vol.7, No.1, pp.179~188, Apr. 1990.
- 3) 奈良岡浩二, 勝倉裕: 構造物の振動の実現可能な最適併合制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.424, pp.125~134, 1991.6.
- 4) 奈良岡浩二, 勝倉裕: 未来の入力情報を利用するフィードフォワード併合制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.438, pp.75~81, 1992.8.
- 5) 斎藤芳人, 星谷勝: 構造物の同定・予測・制御に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.91~100, 1994.4.
- 6) 立石彰, 西岡隆: ウェーブレット分解を利用した構造物の瞬間最適制御, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.231~239, 1998.10.
- 7) 杉山毅, 立石彰, 西岡隆: モード解析による多自由度系構造物の予測震動制御, 応用力学論文集, Vol.2, pp.253~260, 1999.8.
- 8) 佐藤忠信, 上岐憲三, 橋本雅道: 作用時間遅れを考慮した構造物の震動制御, 土木学会論文集, No.428/I-15, pp.193~202, 1991.4.
- 9) 斎藤芳人, 星谷勝: 時系列モデルを用いた多自由度系の瞬間最適予測制御, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.159~166, 1995.1.
- 10) 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報告集, No.527, pp.45~52, 2000.1.
- 11) 市川邦彦: 予測制御とその性質, 日本機械学会論文集, Vol.27, No.182, pp.1652~1663, 1961.10.
- 12) 七屋武士: 予見制御の理論, 日本機械学会誌, Vol.93, No.856, pp.192~197, 1990.3.
- 13) 上屋武士, 江上正: デジタル予見制御, 産業図書株式会社, 1992.
- 14) 樋口龍雄: デジタル信号処理の基礎, 昭晃堂, 1986.

(2000.4.28 受付)

## CONTROL OF STRUCTURAL RESPONSE AGAINST EARTHQUAKES BY USING INFORMATION ON PREDICTED EXTERNAL FORCE

Akira TATEISHI and Takashi NISHIOKA

This paper proposes an algorithm to control seismic response of structures by using information on predicted external force. The proposed control rule is composed of stationary feedback term and feedforward prediction terms. Numerical simulation in one degree of freedom system having one control system is used to clear the efficiency of this method. It shows that feedforward prediction terms act as bandstop filter of seismic wave and that the proposed method has more effective in control efficiency than stationary feedback control.