

三菱重工橋梁エンジニアリング 正会員 ○本山 潤一郎
 広島大学大学院 正会員 辻 徳生
 広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治
 広島大学大学院 正会員 石井 抱

1. はじめに

近年、センサ、コンピュータ、アクチュエータ等の周辺技術の進歩により、制御技術に関する様々な試みがなされている。特に、積極的に制御力を作用させ、振動を低減させるアクティブ制震には高速センサが有効活用できる可能性は高い。高速センサの新たな技術として石井ら¹⁾によって高速高解像度ビジョンが開発されており、1000fpsの速さで最大1000点の追跡処理が可能である。

既に当研究室では Fig.1 に示すような高速ビジョンを用いた AMD(Active Mass Damper)方式の制震システムを構築してきた²⁾。制御力の算定方法には、運動方程式を直接積分する方法を採用し、実験から応答低減(制御時の応答変位/無制御時の応答変位)が 0.3 と十分な効果が確認できているが、2 次モードの発生も確認されている。

そこで、本研究ではアクティブ制震の性能向上に関して検討を行う。その後、将来的に緊急地震情報などの活用を想定した予見制御を本制御システムに加え、それによる効果について検討を行う。

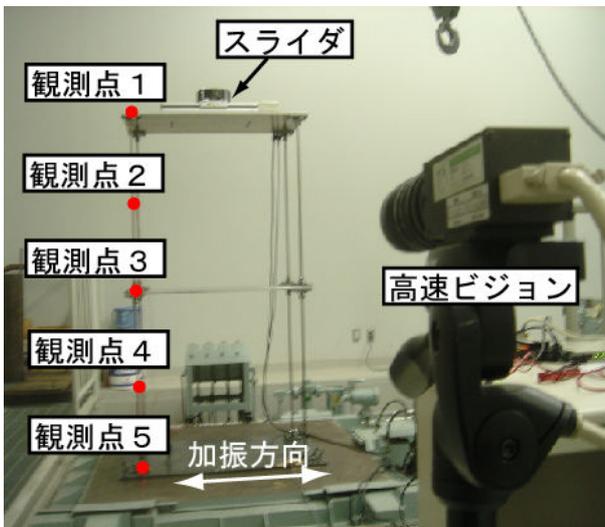


Fig.1 実験状況図

2. 高速ビジョンを用いたアクティブ制震に関する検討

2.1 制御システム

本研究で提案するアクティブ制震は、振動台で地震波加振すると同時に制御システムを起動し、以下の手順で制御を行う。

- ①高速ビジョンにより供試体上の標点変位を計測し、構造物基部の加速度計により入力加速度を計測する。
- ②計測した変位・入力加速度より、式(1)を用いて無制御時での構造物の変位を予測し、その変位増分を α 倍にしたものを制御目標値とする。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{U}_{t+\Delta t} \\ U_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_t \\ U_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \end{bmatrix} \{P_t\} \\ &\quad + \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{t+\Delta t} \\ F_t \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

- ③制御目標値から式(2)を用いて次ステップの制御力 f_1, f_2 を求める

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = (1-\alpha) \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{Bmatrix} U_{t,A} \\ U_{t,B} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} B_A \\ B_B \end{Bmatrix} \right\} \quad (2)$$

ここで、 g_i : 制御力に関するマトリクス、 $U_{t,A}$: 時刻 t における観測点 A の変位、 B_A : 時刻 $t+\Delta t$ における無制御時での観測点 A の変位である。

- ④算出した制御力をスライダへ出力し、構造物を制御する。
- ⑤上記①～④を 1/100 秒間に行い、既定のステップ数に達するまで繰り返し制御を行う。

2.2 実験条件

Fig.1 に示す 4 本の柱材と複数の床からなる骨組模型を実験供試体として用いており、1 次、2 次固有周期は 0.36 秒、0.11 秒である。供試体の柱材上には高速ビジョンのターゲットとして、マーカーを Fig.1 のよ

うに設置している。高速ビジョンとマーカーの距離は約 2m であり、この条件で高速ビジョンに含まれる誤差は 0.1cm 以下である。制御目標値は $\alpha=0.9$ として制御力を算出し、制御力は 0.02 秒に一回スライダへ出力させることとしている。

地震波は阪神大震災時に神戸海洋気象台で観測された NS 波を振動台の特性に合わせて再現した波（以下、神戸波）を用いている。Fig.2 に振動台上で再現した神戸波の加速度波形を示す。地震波の加振方向は Fig.1 に示す通りである。

2.3 既往の実験結果

実験では、供試体の応答変位は高速ビジョンより計測し、応答速度は変位の計測データから最小自乗法を

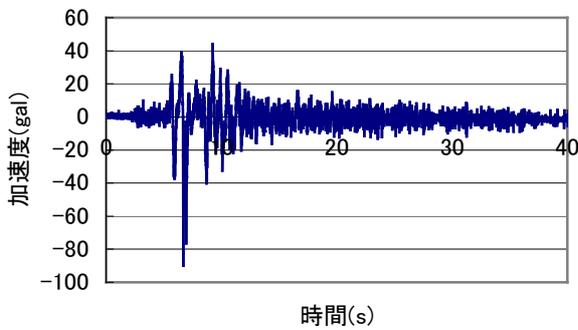


Fig.2 振動台上で再現した神戸波

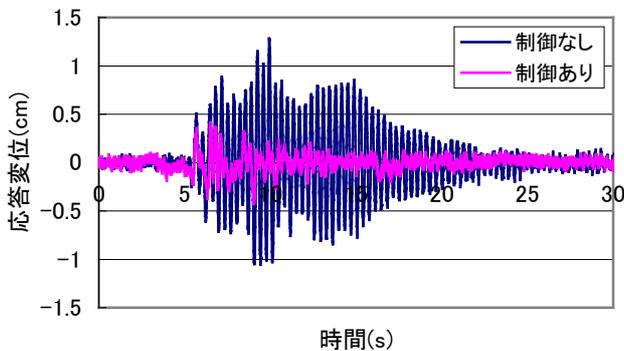


Fig.3 制御の有無による応答変位の比較

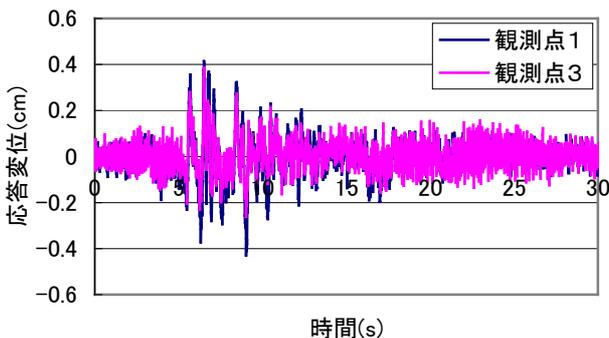


Fig.4 制御時の観測点 1 と 3 における応答変位

用いて算出し、制御力の算定を行っている。Fig.3 に神戸波を作用させたときの観測点 1 の応答変位を制御なしとありの場合について示す。無制御時での最大応答変位は 1.28cm であるのに対して、制御ありでの最大応答変位は 0.41cm、応答低減は約 0.33 という結果が得られた。しかし、Fig.4 に示す制御時の観測点 1 と 3 の応答変位比較図を見ると、地震波入力終了後では特に観測点 3 の振幅が大きくなる 2 次モードが発生していることがわかる。2 次モード発生 の要因として、高速ビジョンや加速度計に含まれるノイズや、最小自乗法を用いた速度の算出過程で生じるノイズにより、短周期成分の制御力が発生したと考えられる。そのため、これらのノイズ処理が必要であると考えられる。

3. 高速ビジョンのノイズ処理に関する検討

3.1 カルマンフィルタ

本振動台実験における高速ビジョンの使用条件の場合、計測変位に最大で 0.1cm のノイズが含まれることがわかっており、そのノイズの影響により短周期成分の制御力が発生し、2 次モードが励起されたと考えられる。そこで、本研究では高速ビジョンに含まれるノイズを、カルマンフィルタを用いて除去し、それによる効果について検討を行う。

カルマンフィルタとは、離散的な誤差のある観測値と解析値から次ステップの最適推定を行うものである。ある時刻における観測値 z と力学的時間発展直後の状態ベクトルはそれぞれ式(3)、(4)のように表すことができる。³⁾

$$z = H\hat{x} + r \quad (3)$$

$$x(-) = \hat{x} + p(-) \quad (4)$$

ここで、 H : 観測行列、 r : 観測誤差、 \hat{x} : 真の状態ベクトル、 $p(-)$: 力学的発展後の誤差である。最適推定値 $x(+)$ は、力学モデルから得た推定値 $x(-)$ と観測値 z との加重平均より求められるとすれば、任意の行列 K_1 、 K_2 を用いて

$$x(+) = K_1 z + K_2 x(-) \quad (5)$$

と表せる。ここで、 K_1 、 K_2 は式(6)、(7)から求められる。

$$K_2 = I - K_1 H \quad (6)$$

$$K_1 = P(-) H^T (H P(-) H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

3.2 実験結果

カルマンフィルタを用いて実験を行った結果について示す。Fig.5 に応答変位の計測値とカルマンフィルタを用いてノイズ処理を行った結果を、Fig.6 に制御なしとカルマンフィルタを用いた制御時での応答変位比較図を、Fig.7 に制御時での観測点 1 と 3 における応答変位を示す。Fig.5 より、カルマンフィルタを用いることで変位の変動が小さい場合に見られるノイズが低減されていることが確認できる。カルマンフィルタを用いた場合、応答低減は 0.34 となり、カルマンフィルタなしの場合と同程度の制震効果が得られた。Fig.4 と Fig.7 を比べると、カルマンフィルタを用いることで地震波入力終了後である 15 秒以降でも、観測点 3 の応答変位は大きくはなっておらず、2 次モードの発生を抑制できていることがわかる。また、Fig.8 に示すカルマンフィルタの有無による制御力のスペクトル比較図をみると、カルマンフィルタを用いることで短周期成分の制御力が大幅に低減されていることがわかる。以上のことから、カルマンフィルタを用いることで、不必要な制御力の発生を抑制することができ、それにより 2 次モードの発生を抑制できるため、より効率的な制御が可能であることがわかった。

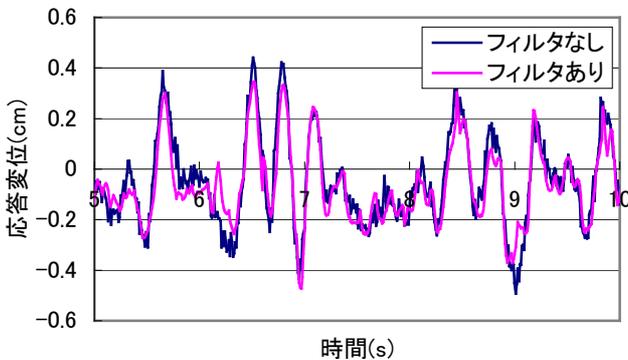


Fig.5 カルマンフィルタのノイズ処理効果

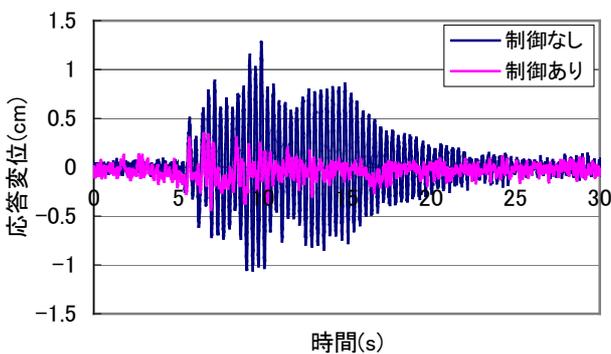


Fig.6 カルマンフィルタを用いた場合の制震効果

4. 予見制御に関する検討

4.1 予見制御を用いた制御手法

予見制御とは、緊急地震速報などにより構造物へ作用する地震力が事前に予見できる場合に、その予見された地震力を用いて変位・制御力の最適化を図る制御であり、現在時刻 k から M_R ステップ未来までの目標値信号、外乱信号が概知であるとして、それらの信号を利用した次式のようにして制御入力を求める⁴⁾。

$$\Delta f(k) = F_0 X_0(k) + \sum_{j=0}^{M_R} F_d(j) \Delta d(k+j) \quad (6)$$

ここで、 $\Delta f(k)$: 制御力入力ベクトル、 $X_0(k)$: 変位ベクトル、 $\Delta d(k)$: 地震力ベクトル、 $F_d(j)$: 予見フィードフォワード係数である。式(6)における右辺第一項の $F_0 X_0(k)$ は本来最適制御理論より求められる制御力項であるが、ここではカルマンフィルタを用いて算出した制御力を代入しており、右辺第二項の予見による制御力と足し合わせることで制御力入力ベクトルを算出している。

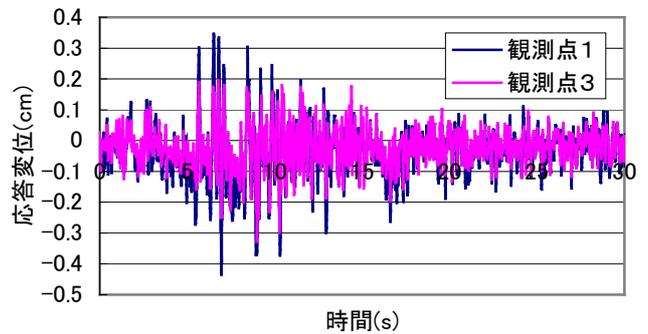


Fig.7 制御時の観測点 1 と 3 における応答変位

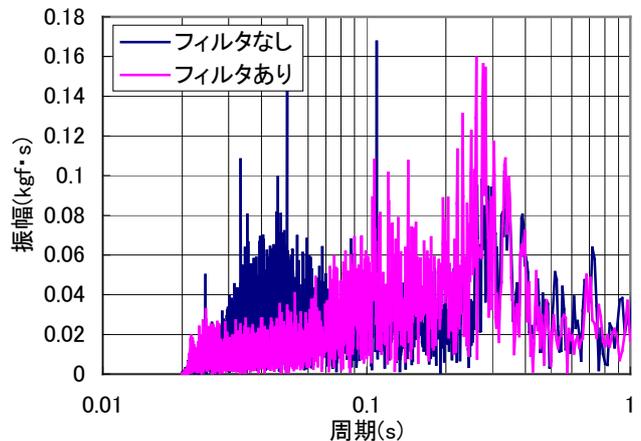


Fig.8 カルマンフィルタの有無による制御力のスペクトル比較図

4.2 予見制御を用いた実験結果

実験では予見ステップ数は 100 とし、1 秒後に到達する地震力が既知である場合を想定して行った。Fig.9 に予見制御時での応答変位を制御なしの場合と比較した図を、Fig.10 に予見の有無による応答変位と制御力の比較図を示す。予見を用いることで、応答低減は 0.24 となり、予見なしの場合での応答低減 0.34 よりも大幅に応答変位を低減できており、予見により構造物へ作用する地震力が既知であるため、急激な地震力が作用する場合でも応答変位を抑制することが可能であると考えられる。Fig.10 の応答変位と制御力の関係を見ると、予見ありの方が若干応答変位に対する制御力の位相が早いことがわかる。また、地震波が到達する直前に着目すると、予見なしではノイズの影響と思われる制御力が発生しているのに対して、予見ありでは、数ステップ後に到達する地震力に対応するような制御力が発生していることがわかる。以上のことから、予見制御の有用性を確認でき、カルマンフィルタと予見制御を用いることで本アクティブ制震システムの性能向上が確認できた。

5. 結論

高速ビジョンを用いたアクティブ制震システムの性能向上に関する検討を行い、得られた結論は以下の通りである。

(1)アクティブ制震システムでは、計測器具などに含まれるノイズの影響により、短周期成分の制御力が発生してしまうため、計測器具の一つである高速ビジョンに含まれるノイズ処理を行った。ノイズ処理の手法としてカルマンフィルタを用いることで不必要な制御力の発生を抑制でき、より効率的な制御が可能であることが確認できた。

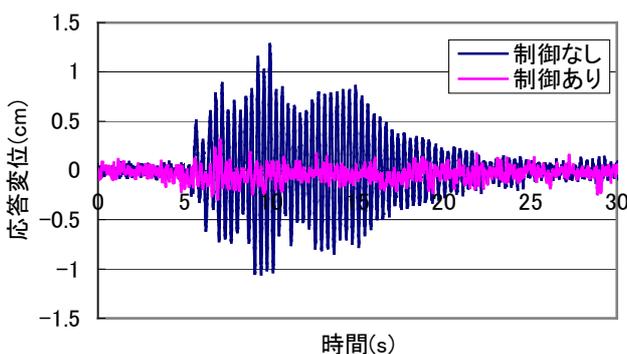
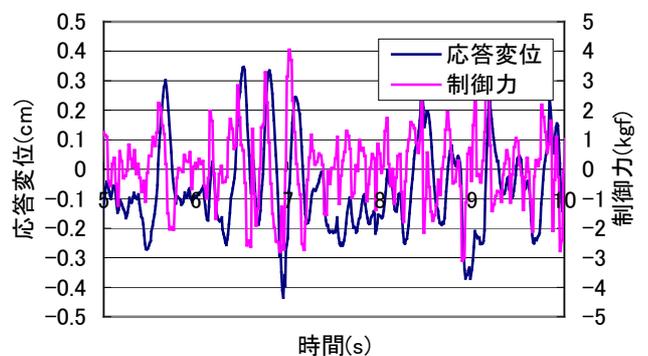


Fig.9 予見制御を用いた場合の応答変位比較図

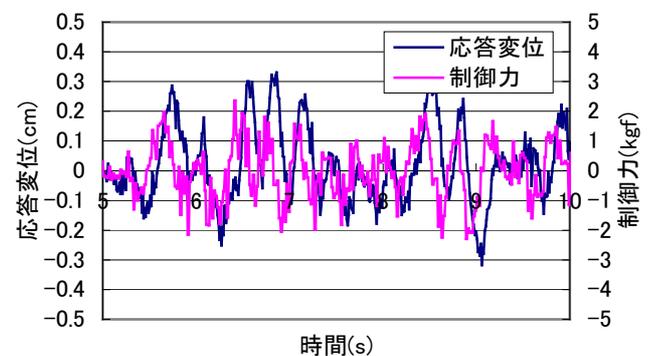
(2)将来的に緊急地震速報などを活用した予見制御に関して検討を行った。予見を用いることで、急激な地震力にも対応した制御力が生じており、予見なしの場合よりも大幅に応答変位を低減できることから、予見制御の有用性が確認できた。

参考文献

- 1) I. Ishii, et al.: Development of a Mega-pixel and Mili-second Vision System using Intelligent Pixel Selection, 2004 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation (TExCRA 2004), pp.9-10, 2004
- 2) J. Motoyama, et al.: Numerical and experimental studies on active control of structures using hyper vision technology, The forth international Structural engineering & Construction Conference (ISEC-4), pp.945-950, 2007
- 3) 片山徹, 応用カルマンフィルター, 東京 朝倉書店, 2000.1
- 4) 土谷武士, 江上正: デジタル予見制御, 産業図書, 1992



(a) 予見なし



(b) 予見あり

Fig.10 予見制御時の応答変位と制御力の関係