

多点変位計測による塔状構造物のアクティブ制振に関する検討

広島大学

広島大学大学院

広島大学大学院

正会員

○田端洋子

辻徳生

佐竹亮一

広島大学大学院

フェロー会員

広島大学大学院

広島大学大学院

学生会員

中村秀治

石井抱

鍵村俊哉

1. 背景と目的

近年、センサ、コンピュータ、アクチュエータなどの技術の発展により、制振技術に関する種々の試みが行われている。特に、地震や強風によって振動する構造物に対して、制御力を作用させ、積極的に振動を抑制するアクティブ制振が注目されている。このアクティブ制振構造を確かなものにするためには、効率的に応答を制御するための目標値を正しく算定し、それを間違いなく制御するための制振技術が必要である。現在に至るまでに制御理論自体はほぼ完成しており、評価関数を用いて制御応答の目標値を算出している。近年、それらを再現するシステム(コンピュータ、センサ、アクチュエータ)が著しく発展し、100(Hz)以上の早さでデータの処理や構造物の変位などの取得が可能となっている。そこで本研究では、高速ビジョン技術を用いて変位計測した結果を制御に利用し、非線形領域にも対応できるアクティブ制振の制御力算定式を提案した後、時刻歴応答解析、振動台実験を通して、提案式の制振効果を検討する。

2. 解析的検討

本研究では運動方程式の直接積分に制御力の項を加えた次式を提案する。

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

ここで、

$$\dot{U}_{t+\Delta t}, U_{t+\Delta t}, F_{t+\Delta t} :$$

時刻 $t + dt$ における速度、変位、制御力

$$\dot{U}_t, U_t, P_t, F_t :$$

時刻 t における速度、変位、外力、制御力

である。

次に制御力 $F_{t+\Delta t}$ の決定について述べる。制御力 $F_{t+\Delta t}$ と変位 $U_{t+\Delta t}$ 以外は既知であることから、右辺の制御力 $F_{t+\Delta t}$ を含む項を除いて計算したものを B_t と置くと、次式のようになる。

$$U_{t+\Delta t} = B_t + G_{21} F_{t+\Delta t}$$

この式からわかるように、 B_t は制御力 $F_{t+\Delta t}$ を作用さ

せないときの、 Δt 後の変位 $U_{t+\Delta t}$ でもある。そこで Δt 後の目標変位として、

$$U_{t+\Delta t} = U_t + (B_t - U_t) \times \alpha$$

を与える。ここで α とは時刻 t の変位 U_t から、制御力を作用させない場合の dt 後の変位 B_t への変位増加量を何%に抑制するかを決める係数である。この式を代入して変形すると、

$$F_{t+\Delta t} = (1 - \alpha) G_{21}^{-1} (U_t - B_t)$$

となり制御力を算定する。

Fig.1 に示す解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行った結果、提案する制振方法は種々の地震波形に効果を発揮し、さらに、従来の制振方法であるパッシブ制振よりも振動抑制効果が大きいことがわかった。例として、神戸波を作用させて制御力を加えた場合の制振なし、パッシブ制振、アクティブ制振の応答変位比較図を Fig.2(a) に示す。

3. 実験的検討

Fig.3 に示す供試体を用いて振動台実験を行った。供試体頂部には Fig.4 に示すモーターの回転軸に振り子を取り付けた装置を設置しており、振り子が加速度を持って動くときの反力が制御力として働く。制御力が作用する様子の概略図を Fig.5 に示す。高速ビジョンカメラにより、Fig.3 のような画像を撮影し、明瞭差のあるマーカーを追うことで変位を計測するシステムを用いている。このカメラは 100(Hz)以上の速さで変位データを取得できることから、式(1)による計算を可能にしている。Fig.6 は制御を行うシステムであり、4つの高速コンピュータを用いて制振システムを構築した。①のパソコンで変位計測を行い、そのデータを③のパソコンに送り、制御力ベクトルを算出する。そのデータを②のパソコンに送り、その制御力に見合った信号を作成してモーターを動かすことで制御力を作用させる。この作業は 0.01(s)の間で行い振動台が揺れている間繰り返し行うことによって制振を行う。また、④のパソコンで発生させる地震波として、阪神大震災時に神戸海洋気象台で観測された地震波(神戸波)、実験の結果、作用させる地震波によって差はあるが最大応答変位を比較すると、制御することで制御しない場合の約 30~55%に抑えることができた。しかし、実験から得られた振動抑制効果は、解析結果の振動抑制効果と比較すると十分ではなかった。パッシブ制振については、解析結果はほぼ一致する結果が得ら

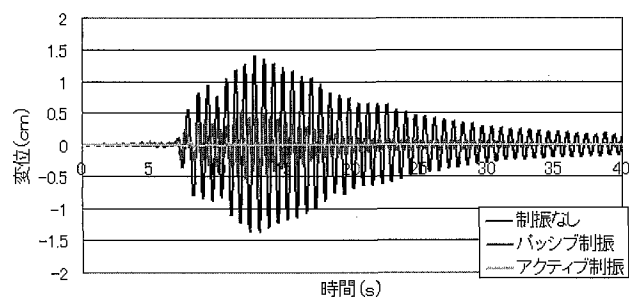
れたが、アクティブ制振については制振システムに更に改良工夫が必要なことが明らかになった。例として、正弦波を作用させた場合の制振なし、アクティブ制振の応答変位比較図を Fig.2(b) に示す。

4. 結論

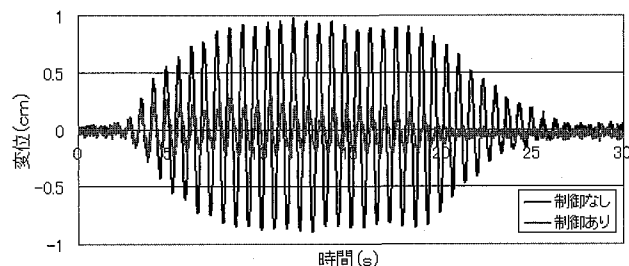
まず、提案する制振方法は解析的には種々の地震波形に顕著な制振効果を発揮し、次ステップの変位を90% ($\alpha=0.9$) に抑える制御力を作用させることで十分な振動抑制効果が見られた。さらに、振動抑制効果はパッシブ制振よりも、はるかに大きいことがわかった。

次に、振動台実験からは、作用させる地震波によって差はあるが、最大応答変位で30~55%に抑えることができた。しかし、解析結果から得られた振動抑制効果に比べるとかなり小さいことがわかった。

今後の課題としては、解析で得た振動抑制効果を振動台実験において再現できなかった原因を探ることが挙げられる。また、将来の地震計ネットワークの発展を前提とした予見制御も検討する必要がある。



(a) 解析結果



(b) 実験結果

Fig.2 応答変位比較図

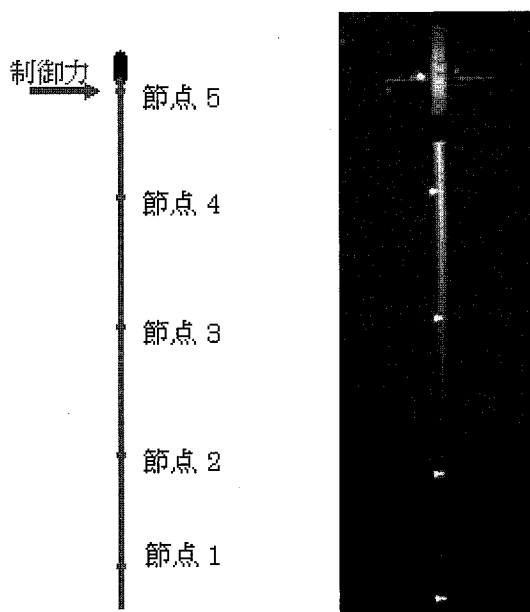


Fig.1 解析モデル

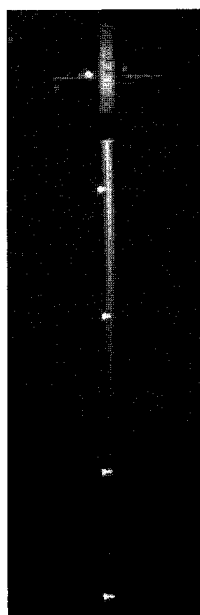


Fig.3 実験供試体

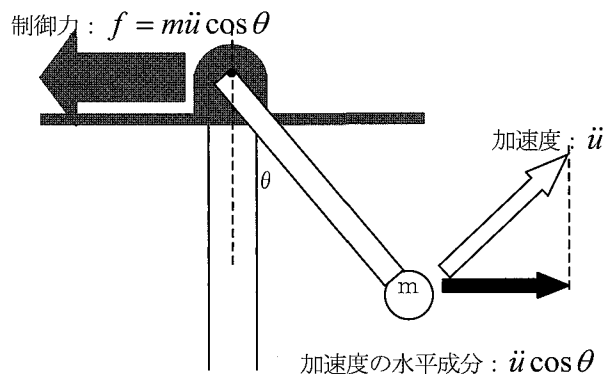


Fig.5 制御力が作用する様子の概略図



- ①変位計測を行うパソコン
- ②信号を与えモーターを動かすパソコン
- ③制御力を算出するためのパソコン
- ④振動台で地震波を発生させるためのパソコン

Fig.6 制御を行うシステム

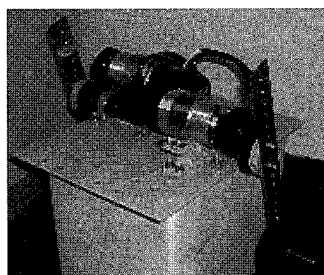


Fig.4 モーターと振り子

参考文献

- (1) 中村秀治, 辻徳生, 石井抱, 佐竹亮一, 本山潤一郎: 高速ビジョンを活用した構造物のアクティブ制振技術に関する検討, 土木学会論文集(投稿中), 2006
- (2) 山田伸志: 振動工学入門(改訂版), 2001
- (3) 崎本達郎: 構造力学 (下), 1993