

高速センサを利用したアクティブ制震に関する検討

中央復建コンサルタンツ（株）

正会員 ○中山 健

広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治

広島大学大学院 学生会員 本山 潤一郎

広島大学大学院 辻 徳生

1. はじめに

近年のコンピュータ、センサ、アクチュエータの技術進歩により、制震技術に関する様々な試みがなされている。特に地震力により振動する構造物に対して、制御力を作用させ、積極的に振動を低減させるアクティブ制震技術が注目されている。このアクティブ制震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出し、それを間違いなく制御するための制震技術が必要である。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等の取得が可能となっている。そこで本研究ではこういった高速コンピュータ、高速センサ、高速アクチュエータ技術を利用した新しい制震法を提案し検証を行った。

2. 研究方法

本研究では最初に Newmark の β 法を利用した制御応答の目標算出式を提案した。Newmark の β 法とは以下の3式を逐次積分することによって、構造物の変位、速度、加速度を算出する方法である。

$$\left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K] \right) U_{n+1} = \{ P_{n+1} \} + [M] \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t^2} U_n + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{U}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{U}_n \right\} + [C] \left\{ \frac{\gamma}{\beta \Delta t} U_n + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \dot{U}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{U}_n \right\} + F_{n+1} \quad (1)$$

$$\ddot{U}_{n+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} U_{n+1} - \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t^2} U_n + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{U}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{U}_n \right\} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{n+1} = \dot{U}_n + \Delta t \{ (1-\gamma) \ddot{U}_n + \gamma \ddot{U}_{n+1} \} \quad (3)$$

式(1)に示す様に、右辺に制御力ベクトル F_{n+1} を付加す



Fig.1 実験状況図



Fig.2 マーカー設置状況



- 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式(4)の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.3 制御システム概要図

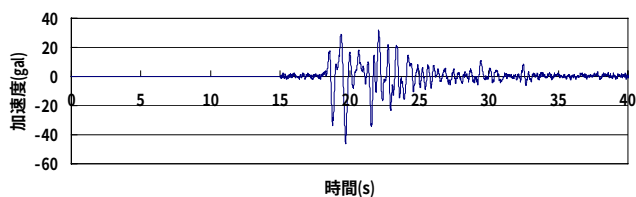


Fig.4 神戸海洋気象台 NS 波の振動台再現波（神戸波）

る。この式から計算時間ステップ $\Delta t(s)$ おきに、構造物の次ステップの変位 U_{n+1} を抑制するような制御力ベクトル F_{n+1} を逐次算出することで制震することを試みた。この提案式は計算時間ステップ $\Delta t(s)$ おきに变位データが取得できることを前提とし成り立つものである。また本報告では省略するが、本提案式は解析的に有効であることが確認できた。そのことを踏まえ、本提案式を利用した制震システムを構築し、振動実験を通して本研究で提案した制震法の適用性を検証する。

Fig.1 は実験に用いる供試体と振動台である．この振動台は X 軸方向に揺らすことができる．さらにワイヤーを Fig.1 のように設置し，高速アクチュエータとして用いたモーターの回転によってワイヤーを巻き取ることにより，点 A, B から力を加えている．また高速センサとして，Fig.2 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．この高速センサは 100(Hz)以上の早さで変位データを取得できることから，式(4)による計算を可能にしている．Fig.3 は制御を行うためのシステムであり，4つの高速コンピュータを用いて制震システムを構築した．Fig.3 で示す様に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，式(4)の変位ベクトル U_n に代入した後，制御力ベクトル F_{n+1} 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．この作業は計算の時間刻み $\Delta t=0.01(s)$ 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震を行う．また④のパソコンで発生させる地震波として，兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台 NS 波を再現した地震波（以下神戸波）を用いており，その加速度波形は Fig.4 に示した通りである．このシステムを用いて，本研究で提案した制震法を検証した．

3. 提案した制震法の適用性の検証

Fig.5 に制御力を作用させないときと，作用させたときの供試体の振動挙動を，Fig.2 のマーカー 4 の X 軸方向の応答変位で示す．0～15(s)の間は，振動台上の強制変位による供試体の応答であり，制御力を加えることで応答が抑えられており，15(s)からの地震波が作用した時においても制御力を加えることで応答変位が抑制されていることが確認できる．また制御力を加えることで最大応答値は 1.3(cm)が 0.3(cm)となり 20%程度に抑えることができた．

次に実測値と解析値の比較を行った．解析には実験で用いた供試体をモデル化し，Fig.4 の神戸波を作用させ，提案式を用いた動的応答解析を行った．Fig.6 に制御力を作用させない時の実測値と解析値をマーカー 4 の X 軸方向の応答変位で示す．Fig.6 から変位，位相ともに

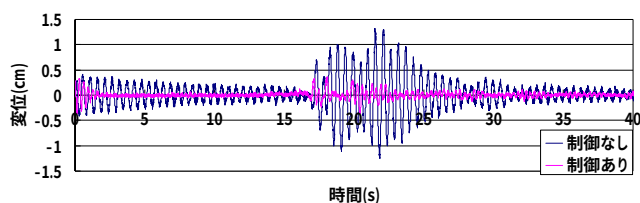


Fig.5 制御有無のマーカー 4 実測変位比較図

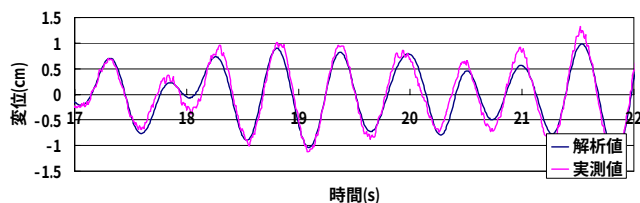


Fig.6 制御なし時の実測値と解析値の比較図

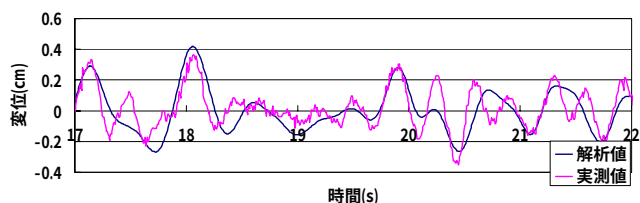


Fig.7 制御あり時の実測値と解析値の比較図

よく一致していることがわかる．Fig.7 は制御力を作用させた時の比較図である．変位はほぼ同等の値を示しているが，位相に関してはずれが見られる．その原因としては，実現象において制御力を加えた時にワイヤー張力による振動が誘発されたことがあげられる．

以上のことから，本制震システムによって振動を抑制できることが確認でき，その実測値は解析値とほぼ同等の値を示していることから，本研究の提案式を実現現象で再現できていることが確認できた．

4. 結論

本研究では高速センサを用いることを前提とした制御応答の目標算出式を提案し，その式と高速センサを利用した制震システムを構築し振動実験を通して制震効果の検証を行った．その結果，十分な振動抑制効果が見られ，解析値とも一致していることが確認できた．以上のことから本研究で提案した制震法が有効であることが確認できた．

参考文献

小堀 鐸二：制震構造—理論と実際—，1993