

I - B176 可変剛性型システムによる吊床版橋のアクティブ制振に関する解析的研究

石川島播磨重工業㈱	正 員	宅和 大助
北海道大学工学部	正 員	小幡 卓司
北海道大学工学部	フェロー	林川 俊郎
北海道大学工学部	フェロー	佐藤 浩一

1. まえがき

近年、土木構造物における地震荷重等の不規則な外力に起因する振動を、アクティブ振動制御により軽減しようとする研究が盛んに行われている。アクティブ制振では、構造物に設置した重錘を駆動することにより、制御力を発生させる制御力型の方式が現在では主流であるが、この方式では重錘のストロークを十分に確保する必要を有するため、制御装置の設置に比較的広いスペースを必要とする。橋梁構造物において鉛直振動を制御対象とする場合、桁高等を考慮すると、制振装置の設置スペースの確保が困難であると考えられる。このような場合、構造物の断面性能を直接変化させることにより制振を行う、可変剛性型システムが有効であることが知られている¹⁾。

そこで本研究では、鉛直振動が卓越する構造物における可変剛性型システムの適用性を検討するために、吊床版橋に対して制振シミュレーションを実施した。具体的には、制御理論に非線形なシステムの作成が可能な瞬間最適制御理論¹²⁾を採用し、吊床版橋のケーブル張力を変化させることにより解析を行った。また、同時に制御力型システムを用いた制振シミュレーションも実施し、両者の比較を通じて、制振効果あるいは適用性等に関して考察を加えた。よって本研究はこれらの結果を報告するものである。

2. 解析手法および制御理論

2. 1. 制御力型システム

一般に、制御力型システムでは、構造物の応答を観測し、それに応じて算出される制御力により重錘を駆動し、その反作用により構造物の応答を制御する。制御力型システムを導入した多自由度系の運動方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) + \mathbf{u}(t) \quad \cdots(1)$$

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $\mathbf{x}(t), \mathbf{f}(t), \mathbf{u}(t)$ は、変位、外力、制御力ベクトルである。状態ベクトルを $\mathbf{x}_s(t) = \{\mathbf{x}(t) \quad \dot{\mathbf{x}}(t)\}^T$ として、式(1)を状態空間表示すると、

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}(t) \quad \cdots(2)$$

となる。ここで、 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$ は、それぞれ、システム、制御力配分、外力配分マトリックスである。評価関数を、重みマトリックス $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ を介した状態ベクトル $\mathbf{x}_s(t)$ と制御力ベクトル $\mathbf{u}(t)$ のそれぞれの2次形式の和として構成すると式(3)の様に表される。瞬間最適制御理論では、評価関数を各時刻に設定して最適化を行っている。

$$J(t) = \mathbf{x}_s^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \quad \cdots(3)$$

式(2)の状態方程式および式(3)の評価関数を離散化すると、制御力 $\mathbf{u}(k)$ は以下の式で表される。なお k は、離散時間系のタイムステップである。

$$\mathbf{u}(k) = -\frac{\Delta t}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(k) \quad \cdots(4)$$

本研究では、制御力 $\mathbf{u}(k)$ を式(1)に代入し、制御力型システムの制振シミュレーションを実施した。なお、制振装置は支間1/4点と3/4点に設置することとし、最大制御力は100Nとした。構造物の時刻歴応答は、ニューマークβ法を用いた直接積分法により解析を行うこととした。

2. 2. 可変剛性型システム

可変剛性型システムは、構造物の応答を観測し、それに応じて計算される可変剛性値をもとに剛性を変化させ、非共振化を図り制御を行う方法である。本研究では、吊床版橋のケーブル張力を調整し剛性を変化させることとした。可変剛性型システムを導入した多自由度系の運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{V}(k)\mathbf{x}(k) = \mathbf{f}(k) \quad \cdots(5)$$

Keywords : アクティブ制振、瞬間最適制御理論、制御力型システム、可変剛性型システム

〒060 札幌市北区北13条西8丁目、北海道大学工学部土木工学科橋梁学講座 TEL (011) 706-6172

ここで、 $V(k)$ は可変剛性マトリックスであり、可変張力 $T(k)$ を含むものとなっている。状態ベクトルを $\mathbf{x}_i(k) = \{\dot{\mathbf{x}}(k) \quad \mathbf{x}(k)\}^T$ として式(5)を状態方程式で表すと、

$$\mathbf{x}_i(k) = A\mathbf{x}_i(k-1) + D\mathbf{f}(k-1) \quad \dots(6)$$

となる。評価関数を重みマトリックス Q 、 R を介した状態ベクトル $\mathbf{x}_i(k)$ と可変張力 $T(k)$ のそれぞれの2次形式の和として構成する。

$$J(k) = \mathbf{x}_i^T(k) Q \mathbf{x}_i(k) + T(k)^T R T(k) \quad \dots(7)$$

制御力型システムと同様に、可変張力 $T(k)$ は次式で表される。

$$T(k) = -R^{-1} \frac{\partial A(k)}{\partial T(k)} \mathbf{x}_i(k-1) Q A(k) \mathbf{x}_i(k-1) \quad \dots(8)$$

以上のようにして、可変張力 $T(k)$ を可変剛性マトリックス $V(k)$ に代入し、式(5)により可変剛性型システムによる制振シミュレーションを実施する。なお、最大可変張力は初期張力(450tf)を考慮して $\pm 300\text{tf}$ とした。可変剛性型システムにおいては、制御に応じて剛性が変化するため非線形応答解析を行う必要がある。そこで本研究では、修正荷重増分法を用いて図-1に示すように吊床版橋を3質点系にモデル化して解析を行った。

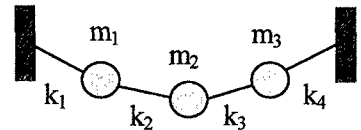


図-1 解析モデル

3. 解析結果とその考察

以上のような手法により本研究では吊床版橋に対するアクティブ制振の解析を行った。解析は、自由振動および強制振動について行い、自由振動に関しては、1次～3次モードの固有振動数をもつ $\sin$ 波を5秒間入力し、入力終了直後に制御を開始することとした。また、強制振動に関しては、釧路沖地震の際に千代田大橋において観測された応答加速度を用いた。解析結果の1例として、「2次卓越」の際の支間中央での応答変位の制御力型システムに関する結果を図-2に、可変剛性型システムの場合の結果を図-3に示す。

図-3から、可変剛性型システムを用いた制振により、かなりの振動抑制効果が発揮されていることがわかる。これに対し、図-2に注目すると、制御力型システムの場合は、制御装置を設置していない位置では有効な制振が行われていないことがわかる。このことから、制御力型システムの場合は、振動モードと制振装置の設置位置により、その効果が左右されるが、可変剛性型システムの場合は振動モードにかかわらず、比較的有効な制振効果が得られることがわかった。強制振動に関しても、可変剛性型システムは、制御力型システムの場合と比較して同等以上の振動抑制効果が発揮されており、吊床版橋のように鉛直振動が卓越するような構造物に対する可変剛性システムの適用は、有効な手法の1つであると考えられる。

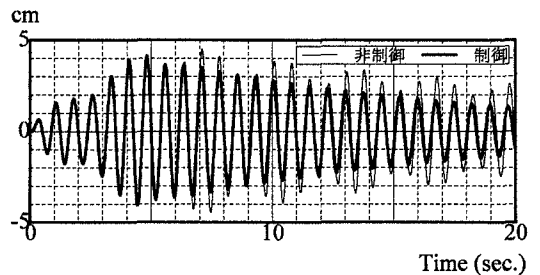


図-2 制御力型システム
（2次卓越 支間中央の応答変位）

4. あとがき

以上のように本研究は、吊床版橋を例として、鉛直振動が卓越する構造物に対するアクティブ制振に可変剛性型システムを採用し、その制振効果あるいは適用性に関して検討を加えたものである。その結果、可変剛性型システムは、振動モードにかかわらず有効な制御が可能であり、制御力型システムに比して、同等以上の制振効果を発揮することが確認された。したがって、可変剛性型システムは、上記のような構造物の制振に対して有効な手法の1つであると考えられる。

<参考文献>

- 1) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993。
- 2) 岡林隆敏、尾口慎也、加賀俊明：各種フィードバック制御則による道路交通振動のアクティブ制御、構造工学論文集、Vol.42A, pp.731-738, 1996。

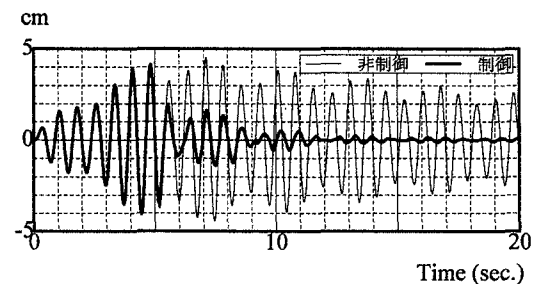


図-3 可変剛性型システム
（2次卓越 支間中央の応答変位）