

I - B175 可変剛性型システムを用いた吊床版橋のアクティブ制振に関する実験的研究

北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司
 石川島播磨重工業㈱ 正 員 宅和 大助
 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

橋梁構造物においては、走行荷重や風荷重等に起因する振動が、その使用性あるいは施工性、耐久性等に大きく影響を及ぼすことが知られている。従来より、主に吊橋や斜張橋の主塔における水平振動に対しては各種のデバイスを用いて振動制御が行われ、近年では次第に実用化の域に達しつつある。

一般に、アクティブ振動制御においては、構造物に設置した重錘を駆動して制御力を得る、いわゆる制御力型が現在では主流である。しかしながら、制御力型では重錘のストロークを十分に確保する必要があるため、通常の桁構造あるいはケーブル構造を有する橋梁等で面内の鉛直振動の低減を目的とする場合、桁高等を考慮すれば、制振装置の設置スペースの確保が極めて困難であることは容易に理解できる。このような場合、部材の断面性能をその応答に応じて変化させ、構造物の振動を抑制する可変剛性型システム¹⁾を用いた制振が有効であると考えられる。

以上を踏まえて、本研究では橋梁構造物における鉛直振動の制御に対する可変剛性型システムの適用性を検討するために、吊床版橋あるいはキャットウォークを想定したケーブル構造を有する実験供試体を作成し、振動制御実験を実施した。可変剛性型システムにおいては構造物の剛性が時間と共に変化するため、この非線形性に対応可能な制御理論を用いる必要がある。そこで本研究では制御理論に瞬間最適制御理論^{1,2)}を採用し、供試体のケーブル張力を変化させることにより実験を行なった。よって、本研究はこれらの結果を通じて、可変剛性型システムの制振効果あるいは橋梁構造物の適用性等に関して考察を加えるものである。

2. 実 験 方 法

2-1. 制 御 理 論

前述のとおり、可変剛性型システムは、観測された構造物の応答量に応じて部材の剛性を変化させて制振を行うため、本研究では非線形性を有する制御対象に対応が可能な瞬間最適制御理論を採用することとした。可変剛性型システムを導入した際の多自由度系の運動方程式は以下になる。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(k) + C\dot{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{V}(k)\mathbf{x}(k) = \mathbf{f}(k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\mathbf{V}(k)$ は可変張力 $T(k)$ をパラメータとする可変剛性マトリックスであり、 k は、離散時間系の時刻 k である。

状態ベクトルを $\mathbf{x}_s(k) = \{\dot{\mathbf{x}}(k) \quad \mathbf{x}(k)\}^T$ として式(1)を状態方程式で表すと、

$$\dot{\mathbf{x}}_s(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}_s(k-1) + \mathbf{D}\mathbf{f}(k-1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで評価関数は、重みマトリックス $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ を介した状態ベクトル $\mathbf{x}_s(k)$ 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。

$$J(k) = \mathbf{x}_s^T(k)\mathbf{Q}\mathbf{x}_s(k) + T(k)^T \mathbf{R}T(k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、式(3)より可変張力 $T(k)$ は次式のように得ることができる。

$$T(k) = -\mathbf{R}^{-1} \frac{\partial A(k)}{\partial T(k)} \mathbf{x}_s(k-1) \mathbf{Q} \mathbf{A}(k) \mathbf{x}_s(k-1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上のようにして、観測された状態ベクトルを式(4)に代入することにより可変張力 $T(k)$ を逐次求め、可変剛性型システムによる振動制御実験を実施した。

2-2. 可変剛性型実験システム

本研究で用いた実験供試体は、写真-1に示すような吊床版橋あるいはキャットウォークを想定したケーブル構造物である。上記のとおり、このケーブル張力を式(4)に基づいて直接変化させることにより、実験を行った。実験供試体の基本的な諸元は、支間長 199.5cm、ケーブル長 200cm、サグ量 6cm、初期張力 16.58kgf である。

具体的な実験方法は、まず供試体上に設置した加速度計によって測定された応答値を DPM、A/D 変換ボード³⁾を介して直接パソコンに入力する。パソコン内では、数値積分により速度および変位応答値の算出を行い、制御則に基づき必要な可変張

Keywords : アクティブ振動制御、可変剛性型システム、瞬間最適制御理論

〒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

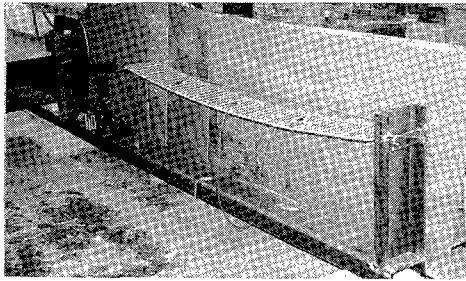


写真-1 実験供試体

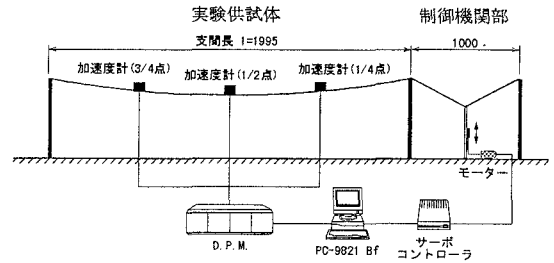


図-1 可変剛性型実験システム

力を求めてアクチュエータの作動命令を出力するものである。図-1に本研究で用いた実験システムの概略図を示す。なお、最大可変張力は初期張力およびアクチュエータのストローク（ $\pm 25\text{mm}$ ）を考慮して、最大 $\pm 3.1\text{kgf}$ とすることとした。

3. 実験結果およびその考察

本研究では、以上のような制御理論ならびに実験システムを用いて振動制御実験を実施した。制振は自由減衰振動に対して行うこととし、支間3/4点または1/2点に重錘を吊り下げることによって強制変位を与え、これを急速解放すると同時に制御を開始して所定のデータを得た。なお、式(4)の重みマトリックス Q 、 R に関しては、予備実験によって有効な制振効果が得られる組合せを検討した上で決定することとした。

まず表-1は実験供試体の振動特性を把握するためにに行った、減衰自由振動実験の結果である。表-1から、本研究の実験供試体は、比較的近接した固有振動数を持つ多数の振動モードが存在する、ケーブル構造特有の振動特性を有することがわかる。次に、図-2(a),(b),(c)に支間3/4点に強制変位を与えた場合の実験結果を示す。なお、図中の細線は非制御時を、太線は制御時を表している。図-2より、制御時の応答は非制御時に比してかなりの振動抑制効果が発揮されていると思われる。図-2(c)に着目すると、4次以下の低次のモードに対してはフーリエスペクトルのピーク値が概ね1/2程度に減少し、非常に有効な制振が行われているものと判断できる。また、高次の振動モードに対しても、可変剛性型システムの特徴である非共振化が図られており、ピーク値そのものが低減されていることから、制御による剛性変化が効果的に作用しているものと考えられる。したがって、可変剛性型システムは鉛直振動の制御に関して非常に有効な振動抑制効果を発揮することが確認され、比較的近接した複数の振動モードに対しても対応が可能であることから、特に吊床版橋のようなケーブル構造の制振に適した手法の1つであると思われる。

4. あとがき

以上より、本研究は橋梁構造物における鉛直振動の制御に対する可変剛性型システムの適用性を検討するために、振動制御実験を実施し、その制振効果あるいは橋梁構造物の適用性等に関して考察を加えたものである。その結果、可変剛性型システムは非常に有効な振動抑制効果を発揮することが確認され、複数の振動モードに対しても対応が可能であることから、橋梁構造物等の制振に適した手法の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) 岡村隆敏、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。

表-1 固有振動特性一覧表

振動モード	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
固有振動数(Hz)	4.39	5.05	6.96	8.76	11.06	11.84	13.21
減衰定数(%)	0.766	2.892	0.910	0.774	0.598	1.705	0.438

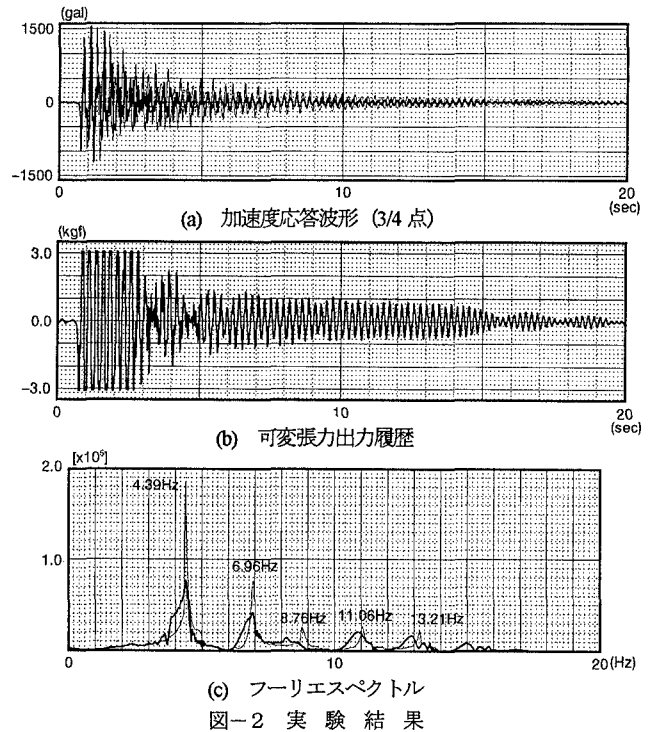


図-2 実験結果