

外ケーブルを用いた橋梁構造物の可変剛性型セミアクティブ制御に関する一考察

北海道大学大学院工学研究科 学 生 員 ○宮森 保紀
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一
 北海道大学大学院工学研究科 学 生 員 鈴木 隆

1. はじめに

既存の橋梁構造物の多くは、通過車両の大型化による活荷重の増大への対応や、大規模地震動に対する安全性の向上が必要であり、より簡便かつ効果的に構造物の性能を向上させる手法の開発が求められている。近年、振動制御はこれらの安全性あるいは振動使用性などを改善させる一手法として注目されており、アクティブ方式、パッシブ方式あるいは両者の長所を併せ持つ、セミアクティブ制御に関する研究が盛んに行われ、橋梁構造物において振動制御が適用可能な範囲も拡大しつつある。本研究においては、桁構造を有する橋梁に設置した外ケーブルの張力を、構造物の応答に応じて変化させる可変剛性型セミアクティブ制御を適用し、既存の構造物の性能を向上させることを目的とした。このセミアクティブ制振システムに対して、強制振動による制振シミュレーションを実施し、その適用性や振動抑制効果に関して考察を試みるものである。

2. 解析手法

2.1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では制御対象として、表-1のような諸元を有する鋼床版2主桁形式の一般的な横断歩道橋の断面諸元を用いて、図-1のような2次元多自由度系モデルを構築した。固有振動解析から得られた解析モデルの固有振動特性を表-2に示す。一般に多自由度系の運動方程式は式(1)のように表現することができる。

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

ここで $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ および $\mathbf{f}(t)$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび外力ベクトルであり、本研究では減衰マトリックスに質量比例型減衰を用いた。質量比例型減衰マトリックスにおける減衰定数は実測値を用いることとし、表-2の値を採用した。時刻歴応答解析手法としては、ニューマークβ法による直接数値積分法を採用し、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 、係数βは $1/4$ として解析を行った。解析は強制振動について行うこととし、1993年1月15日に発生した釧路沖地震の際に、千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度波形（最大 243.8 gal ）を用い、その最大加速度を 100 gal に変換して、解析モデルの鉛直方向に入力した。

2.2 可変剛性型セミアクティブ制御

本研究における可変剛性型システムは、主桁に設置した外ケーブルの張力によって制御対象に軸力を導入し、これを構造物の動的応答量に応じて変化させることで構造物の剛性を可変とするものである。

可変剛性型システムを導入した場合の運動方程式は式(2)で表現される¹⁾。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v)\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \cdots \cdots (2)$$

式(2)における $\mathbf{K}_v$ は、制御によって構造物に付加される可変剛性マトリックスである。本研究では、一般的なアクティブ制御を行う際に用いられるような制御理論を用いることなく、より簡便な制御則によって制御を行うために、構造物の応答に応じて制御張力による剛性の付加を一義的に行う ON-OFF 制御を採用することとした²⁾。このような制御手法は構造物の固有振動特性に基づいて制御則を構築することが一般的であり、制御システムの構築を比較的容易に行うことが可能である。具体的には制御対象の1次モードの応答に着目して制御を行うこととし、支間中央点の鉛直方向の応答加速度に対して、1次モード成分を通過させるようなローパスフィルタによって振動成分の抽出を行う。抽出された応答加速度を設定された基準値と比較することによって制御装置の状態を決定するが、このような手法によって構造物の制御を行う場合、構造物に与える軸力の大きさと、状態を切り替える指標となる応答量の設定は、制振効果に大きな影響を与えられと考えられる。本研究においては予備的な制振シミュレーションによって検討を行い、構造物に作用させる軸力を 490 kN 、応答加速度の基準値は 20 gal に設定した。

表-1 断面諸元

支間長(m)	29.3
断面積(m^2)	2.98×10^{-2}
断面2次モーメント(m^4)	2.00×10^{-3}
単位長さ重量(kN/m)	2.29
主桁断面形状(mm)	Flg. 250×16
	Web. 768×9

1,2,...: 節点番号 ①,②,...: 部材番号

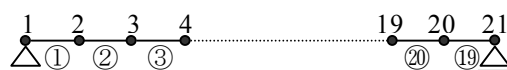


図-1 解析モデル

表-2 固有振動特性

固有振動モード	1st	2nd
固有振動数(Hz)	2.43	9.71
固有周期(sec)	0.41	0.10
減衰定数(実測値)(%)	1.494	0.657

キーワード：セミアクティブ制御、外ケーブル、可変剛性型システム、橋梁構造物

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL: 011-706-6172 FAX: 011-706-6172

3. 解析結果およびその考察

解析結果として、図-2に支間中央点における非制御時・制御時および常にケーブル張力を作用させた状態に固定した場合の支間中央点の応答加速度を、図-3に制御張力の出力履歴を示す。また、図-4は応答加速度のフーリエスペクトルである。なお図-4においては、制振効果を比較するために、非制御時の最大値で無次元化を行っている。

図-2における応答加速度波形に着目すると、入力加速度が急激に増加する約7～10秒においては制御による応答の低減はあまり明確ではないが、比較的大きい入力外力が作用し続ける10秒以降においては高い振動抑制効果が発揮されていることがわかる。著者らの従来の研究³⁾においても、構造成能可変型セミアクティブ制御は、入力外力が比較的長時間継続するような場合に、高い制振効果を有することが確認されており、本研究の解析結果でも同様の傾向が表れたものと考えられる。図-3の制御張力の出力履歴についても併せて考察すると、応答加速度が増大し始める5秒前後から張力の付加が行われ、最大応答加速度が発生する10秒前後では、頻繁に制御装置の状態が切り替わっており、これによって振動応答の抑制が行われているものと認められる。また、図-4のフーリエスペクトルについては、制御によって1次モードの応答が非制御時の50%以下に低減されており、制御系設計時に対象とした卓越モードの振動抑制に大きな効果を発揮していることが確認できる。さらに張力を固定した場合との比較においても、制御を行った場合に構造物の応答がより小さくなる結果が得られた。これは制御装置の状態を構造物の応答量に応じて即時に変化させる、セミアクティブ制御系の設計が適切に行われたためと考えられ、制御対象に作用させる軸力を一時的に増大させることによって、常に構造物にプレストレスを導入した場合と同等以上の効果を得ることが可能になるものと思われる。

以上の解析結果より、本研究で採用した構造物への付加張力を一時的に切り替えるような制御手法によっても、構造物の振動を十分に制御することが可能であることが判明した。したがって、外ケーブルを制振デバイスとして利用した制御手法を用いることで、既存の橋梁構造物に対しても十分な適用性を有する結果が得られたものと思われる。

本研究では簡便に制御則を構築するために、構造物の応答加速度のみを観測対象としたが、応答速度や応答変位などの情報を用い、構造物の振動の状態を考慮することで、主要動に対する制振効果を向上させることが可能であると推定される。また、構造物に作用させる軸力と制御装置の切り替え基準値については、予備的な制振シミュレーションによって決定したが、これらの値の設定は、制御効果、あるいは制振効率にきわめて大きな影響を与えることが知られている。したがって、遺伝的アルゴリズム(GA)などの最適化手法を用いて、構造物の応答をより効果的に制御できる制御則の構築が必要であると考えられる。

4. あとがき

本研究では、桁構造を有する橋梁構造物を制御対象とし、構造物に作用させる軸力を変化させる可変剛性型セミアクティブ制御による制振シミュレーションを行い、その制振効果および適用性に関して考察を加えたものである。

解析結果から、制御時の応答加速度は非制御時と比較して大きく抑制されており、また、構造物に作用させる軸力を固定した場合の解析結果と比較しても、より大きな振動抑制効果が得られていることが判明した。以上より本研究の制御手法は、既存の橋梁構造物の安全性や振動使用性などを改善するための有効な一手法になり得ると考えられる。さらに、制御装置の状態のON-OFFのみを切り替えるような制御手法は、例えば走行荷重に対して制御を行うことにより、より大きな設計荷重に対応することも可能であると判断でき、既設、新設を問わず、橋梁構造物の性能向上に寄与するものと思われる。

【参考文献】

- 1)宮森保紀、小幡卓司、鈴木隆、林川俊郎、佐藤浩一：外ケーブルを用いた橋梁構造物の可変剛性型セミアクティブ制御について、土木学会北海道支部論文報告集、第57号、I-21, pp.80-83, 2001. 2)伊津野和行、川村弘晶、森泰樹、小林紘士：簡易アクティブ制御連結システムによる線状に連続する構造物の地震応答低減の試み、土木学会論文集、No.647/I-51, pp.229-240, 2000. 3)宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：可変減衰型セミアクティブ制御の橋梁構造物への適用に関する一考察、構造工学論文集、Vol.47A, pp.371-380, 2001.

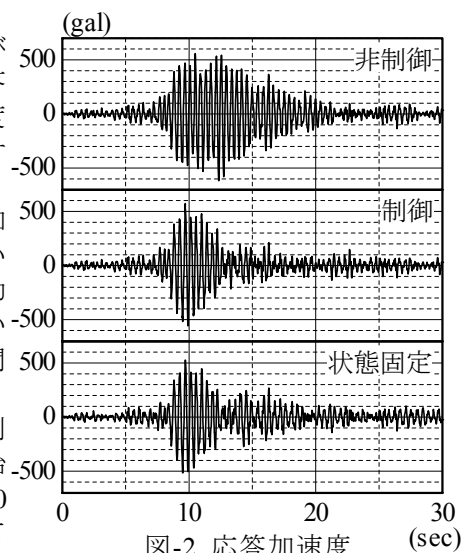


図-2 応答加速度

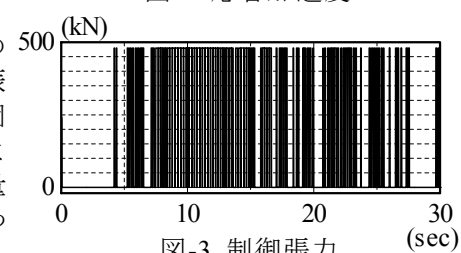


図-3 制御張力

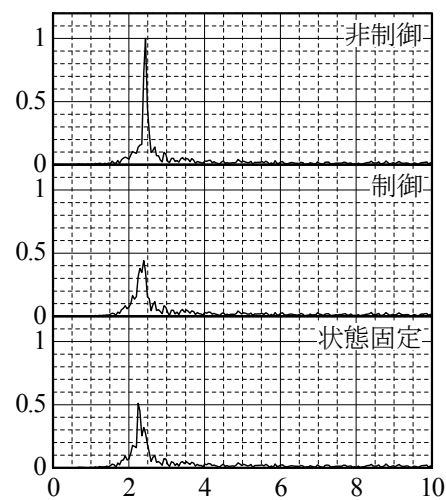


図-3 フーリエスペクトル(Hz)