

鋼橋の動的性能向上を目指したセミアクティブ交通振動制御の適用性について

北海道大学大学院工学研究科 学生員 ○鈴木 隆
 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 F 会員 林川俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一

1. まえがき

高度経済成長期以降に架設された既存の橋梁構造物において、増大する交通荷重への対応や地震動に対する安全性向上等のために何らかの対策が必要とされる場合がある。近年では振動制御がこれらの動的性能を改善す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できる範囲も拡大しつつあると思われる。

本研究で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方式によって制振シミュレーションを行い、その制振効果の検討を目的とする^{1),2)}。具体的には制御対象として単純桁橋を骨組構造モデルに構築し、車両の走行により発生した鉛直振動に対して、制御装置として設置した外ケーブルの張力を構造物の応答に応じて切り替えることにより振動応答の低減を試みるものである。付加する制御張力の算出には ON-OFF 制御、および瞬間最適制御理論を用いることとし、それぞれの場合について制振シミュレーションを実施することとした。したがって本研究は、桁構造を有する橋梁の外ケーブルによる振動制御の可能性、あるいは適用性などに関して検討を加えるものである。

2. 解析手法

2.1 制御対象橋梁のモデル化

本研究では、旧建設省制定土木構造物標準設計に基づいてスパン 40(m)、6 主桁形式の単純桁橋を解析対象とし、これを、2 次元多自由度系にモデル化することとした。可変剛性型システムの導入については、橋梁構造物の補強手法としてこれまで比較的多くの適用例がある外ケーブルを応用することを想定し、外ケーブルに加える張力を構造物の動的応答量に応じて変化させることで振動制御を試みる。図-1 には本研究で採用した外ケーブルを有する制御対象橋梁の解析モデルを示す。また本研究では、1 本当り直径 80mm、断面積 4460mm²、切断荷重 5.19MN の鋼製ケーブル 12 本を、各主桁に 2 本ずつ設置することとした。

2.2 ON-OFF 制御

一般に可変剛性型システムの運動方程式は式(1)のよう表現することができる³⁾。

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

ここで M, C, K および K_v はそれぞれ整合質量マトリックス、質量比例型減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび可変剛性マトリックスである。また $f(t)$ は外力ベクトル、 $\phi(t)$ は荷重分配係数ベクトルである。制御張力は、ケーブル一本当りの初期張力 40.8kN に対して、制御時 4.08MN に設定した。また ON-OFF 方式の制御系設計に

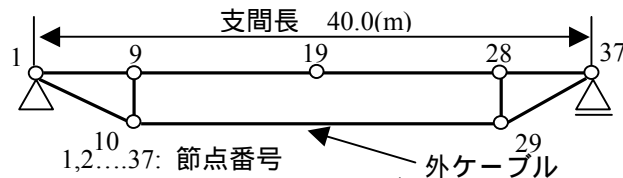


図-1 解析モデル

表-1 固有振動数(Hz)

制御張力無		制御張力有	
1 次	4.13	1 次	4.70
2 次	15.30	2 次	15.96

先立ち、解析モデルに対して制御張力を付加しない場合(以下、通常状態と称する)と、張力を付加した場合(以下、作動状態と称する)の固有振動数の変化を把握した。表-1 はその結果であり構造物に張力を付加することで1次固有振動数が13.8%上昇することが確認された。本研究では、上述の1次モードの固有振動数が変化することに着目し、支間中央点における鉛直方向の応答加速度に対して、通常状態の1次モード成分をローパスフィルタ、作動状態の1次モード成分をハイパスフィルタによってそれぞれ抽出した。この得られた応答加速度が、それぞれ設定された基準値を超えた場合に構造物に付加する張力を変化させ制御を実施する。また状態の切り替えを行う基準値は、予備的な制振シミュレーションを行い、ローパスフィルタ、ハイパスフィルタに対してそれぞれ80gal, 350gal に設定した。

2.3 瞬間最適制御理論

式(1)を可変剛性配置マトリックス L を用いて表すと式(2)のようになる³⁾。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + (K + L^T V(t)L)x(t) = f(t)\phi(t) \quad (2)$$

式(2)において $V(t)$ は可変剛性マトリックスである。ここで、可変剛性ベクトル $v(t)$ を導入し、式(2)の最終項を次式(3)で置換する。

$$L^T V(t)Lx(t) = L^T F(t)v(t) \quad (3)$$

式(3)の、 $F(t)$ は制御装置の相対変位を対角要素に持つマトリックスである。さらに、次式のように重みマトリックス Q を介した状態ベクトル $x_s(t)$ と、 R を介した可変剛性ベクトル $v(t)$ の2次形式の和で評価関数は定義される。

$$J(t) = x_s^T(t)Qx_s(t) + v^T(t)Rv(t) \quad (4)$$

本研究では、式(4)が各離散時間において最小になるように算出した可変剛性ベクトルを、式(2)へ代入し制振シミュレーションを行うこととした。

2.4 車両および路面凹凸のモデル化

本研究では走行車両による時刻歴応答解析に際して、図-2 に示すような1自由度系の車両モデルを用いた⁴⁾。車両の諸元は自動車荷重を250kN(25tf)荷重とし、

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、交通荷重

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

$m=2.55\text{ton}$, $c=3.63\text{kN}\cdot\text{sec/m}$, $k=8879\text{kN/m}$ とした。

路面凹凸の設定に関しては、スペクトルモデル法を採用し、次式で与えられる路面凹凸パワースペクトル密度 $S_r(\Omega)$ をモンテカルロ法により算出する⁵⁾。

$$S_r(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^n + \beta^n} \quad (\Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_U) \cdots (5)$$

式(5)において、本研究では比較的粗い路面凹凸を想定し $\alpha=0.003\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c})$, $n=2$, $\beta=0.02\text{c/m}$, $\Omega_L=0\text{c/m}$, $\Omega_U=1.0\text{c/m}$ に設定した。なお、時刻歴応答解析の手法としては、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 $\Delta t=0.01$ 、係数 β は $1/4$ として解析を行った。

3. 解析結果およびその考察

本研究では可変剛性型セミアクティブ制振シミュレーションに際して車両速度を 36km/h に設定し解析を行った。図-3 は解析結果であり、(a)は非制御、ON-OFF 制御、瞬間最適制御のそれぞれ支間中央における鉛直方向変位、(b)はそれらのフーリエスペクトルを示したものである。フーリエスペクトルは、比較検討のため非制御時の最大値で無次元化を行った。また(c)には ON-OFF 制御の制御張力履歴を、(d)には瞬間最適制御の制御力履歴を示している。なお ON-OFF 制御および瞬間最適制御においては、両者の制御力の実効値が等しくなるように比較を行った。また表-2 はそれぞれの解析ケースにおける最大応答変位およびその実効値の一覧である。

ON-OFF 制御の制振効果について考察を加えると、構造物の動的応答量の増大に伴って制御張力の付加が行われ、応答変位が減少していることがわかる。表-2 から、非制御時に対して最大応答変位は約 20%、実効値は約 22%減少し、構造物に張力を一時的に付加することでも応答変位を抑制することが可能なことが明らかになった。また、フーリエスペクトルに着目すると、車両の固有振動数である 3.0Hz の応答が ON-OFF 制御によって低減され、構造物の 1 次固有振動数は明らかに変化し、非共振化が行われていることがわかる。

一方、瞬間最適制御理論を適用した場合の制振効果については、構造物の 1 次固有振動数を有する振動数成分では若干の振動抑制効果が得られたものの、車両の走行による応答に対しては十分な制振効果が発揮されない結果となった。瞬間最適制御においては、式(4)における重みマトリックスを最適化することで制振効果を向上させることは可能であると考えられるが、これを行うためには制御に関する高度な専門知識が必要である。これに対して、フィルタリングした応答加速度を基準値と比較するのみの簡便な手法で振動抑制効果が得られた本研究の ON-OFF 制御は、橋梁構造物の制振手法の一つとして比較的高い適用性を有するものと思われる。

4. あとがき

本研究は桁構造を有する既存橋梁に外ケーブルを用いた可変剛性型システムを導入し、ON-OFF 制御および瞬間最適制御によって、交通振動に対する振動制御シミュレーションを実施し、その制振効果や適用性について検討したものである。

解析結果から、制御張力の ON-OFF を応答加速度のみを指標にして切り替える本研究のような簡便な手法でも交通荷重に対する振動は低減され、瞬間最適制御のようなアクティブ方式と比較しても、それを上回る制振効果

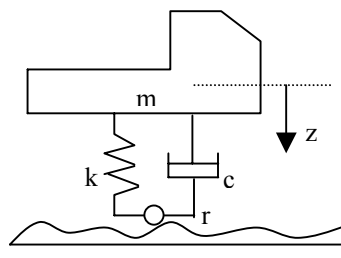


図-2 車両モデル

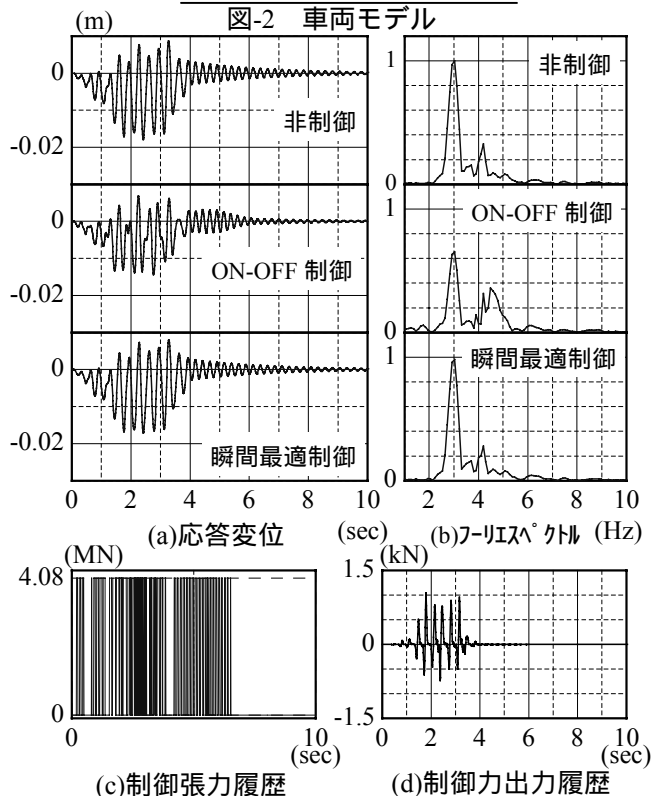


図-3 解析結果

表-2 動的応答量（支間中央・単位 m）

	MAX	RMS
非制御	0.0179	0.0046
ON-OFF 制御	0.0144	0.0036
瞬間最適制御	0.0171	0.0045

が得られることが判明した。また 1 次モードに着目した制御を行ったにもかかわらず、 3.0Hz 付近の車両による応答にも効果があり、また 1 次モードは顕著な非共振化が見られるため、ある程度のロバスト安定性を有しているものと思われる。以上から、一般的な構造形式の橋梁に本研究のような ON-OFF 制振を適用することで、構造物にプレストレスのような応力を常時加えることなく動的性能を向上させることができ、既存橋梁の保有性能を維持、改善するための有効な手法になり得るものと期待できる。

【参考文献】

- 宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、鈴木隆：外ケーブルを用いた可変剛性型セミアクティブ制御について、鋼構造年次論文報告集第 9 巻、pp333-338,2001。
- 宮森保紀、鈴木隆、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、外ケーブルを用いた可変剛性型セミアクティブ制御の交通振動に対する適用性について、土木学会北海道支部論文報告集、第 58 号、I-60,pp216-219,2002。
- 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993。
- 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993。
- 星谷勝：確率論手法による振動解析、鹿島出版会、1974。