

**1. まえがき** 近年における車両の大型化と交通量の増加は著しく、そのため道路橋の疲労損傷や振動使用性あるいは環境振動影響などが問題となり、その対策の一つとして交通振動制御が注目されるようになってきた<sup>1)</sup>。筆者らは、制振効果の高いハイブリッド制振装置を開発し、曲げ振動のみを考慮した模型桁に対する実験を行った<sup>2)</sup>。さらに、実橋では曲げとねじりの連成振動が起こるので、偏心走行が可能な模型桁を新たに製作し、ハイブリッド制御の制振効果を確認した<sup>3), 4)</sup>。本研究では、制御力を評価するためにハイブリッド制御の定式化を行い、この実験を補うシミュレーション解析を行う。

**2. 振動制御装置の概要<sup>2)</sup>** 本制振装置は、制振質量を板ばねで支持する片持ち梁を基本系とし、その固有振動数は橋桁のそれにほぼ一致させ、パッシブな性質を持たす。制御力を加えるACサーボモータと制振質量とは、プーリおよびタイミングベルトにより結合させる。橋桁に加速度センサーを取付け、制振質量の変位を橋桁に追従させる位置サーボ系を構成する。橋桁の振動に対し常に制振質量の位相を90°遅れとすることにより効果的な制振機構となる。本ハイブリッド型制振装置の基本仕様をTable 1に掲げる。

### 3. ハイブリッド制御の定式化

Fig. 1に示すようなモデルでハイブリッド制御システムの定式化を行う。ACサーボモータが制振質量に制御力を加える際の桁への反力を $u$ とし、制振装置を取り付けたばねの変位を $y_r$ 、その位置の桁の変位を $y_b$ とすると、制振システムが外力として桁に与える力は次式のように与えられる。

$$P_r(t) = k_r(y_i - y_b) + c_r(\dot{y}_r - \dot{y}_b) - u \quad \dots\dots\dots (1)$$

制振装置の位置を $x_r$ とすると桁の変位 $y_b$ は、次式で表せる。

$$y_b = \sum_i a_i(t) v_i(x_r) + e_r \times \sum_i c_i(t) \varphi_i(x_r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $a_i(t)$ 、 $c_i(t)$ は曲げ振動とねじり振動に対する一般化

座標であり、 $v_i(x)$ 、 $\varphi_i(x)$ はそれぞれの基準関数である。 $e_r$ はせん断中心から制御力载荷点までの距離である。一定速度 $v$ で走行する荷重列による橋の応答について、 $a_i(t)$ 、 $c_i(t)$ に関する次の連立微分方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{a}_i + 2h_{b_i}\omega_{b_i}\dot{a}_i + \omega_{b_i}^2 a_i + z_i\ddot{c}_i &= \frac{I}{M_{b_i}} \sum_{j=1}^h \sum_{s=1}^2 \sum_{k=1}^{\alpha(x)} v_i(x_{jsk}) P_{jsk}(t) + \frac{I}{M_{b_i}} v_i(x_r) P_r(t) \\ \ddot{c}_i + 2h_{n_i}\omega_{n_i}\dot{c}_i + \omega_{n_i}^2 c_i + \frac{z_i}{\gamma_i}\ddot{a}_i &= \frac{e}{M_{n_i}} \sum_{j=1}^h \sum_{s=1}^2 \sum_{k=1}^{\alpha(x)} \varphi_i(x_{jsk}) P_{jsk}(t) + \frac{e_r}{M_{n_i}} \varphi_i(x_r) P_r(t) \end{aligned} \right\} (i=1,2,\dots,n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $P_{jsk}(t) = \frac{I}{ax(s)} P_{js}(t)$ 、( $P_{js}(t)$ は前後輪の接地力)は車両からの外力であり、 $e$ はせん断中心から車両载荷点までの距離である。

ハイブリッド制振装置における制振質量の運動方程式は次式のようになる。

$$m_r \ddot{y}_r + c_r(\dot{y}_r - \dot{y}_b) + k_r(y_r - y_b) = u \quad \dots\dots\dots (4)$$

### 4. 解析モデル

**4.1 桁モデル** 橋長5.4mの偏心走行を可能にした単純支持桁を等断面としてモデル化する。制振装置は支間中央の車両走行位置下に設置し、偏心走行時の偏心距離は0.2mである。模型桁の構造諸元を Table 2に掲げる。路面凹凸に関しては、阪神高速道路梅田入路橋における実測路面凹凸データを1/2の高さにし、それを相似させる<sup>2)</sup>。

**4.2 車両モデル** 総重量 $w_v=23.4\text{kgf}$ 、 $28.4\text{kgf}$ で固有振動数 $f_v=3\text{Hz}$ とする。模型車の振動特性をTable 3に掲げる。走行速度としては、速度 2.80m/s～4.56m/sの範囲で5段階に変化させている。これを、例えばスパン長40.4m、1次固有周期 0.429secの桁橋に当てはめると67.8km/h～109.8km/hになる。

Table 1 Properties of hybrid control system

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| Control mass                 | 3.066 (kg)  |
| Natural frequency            | 3.0~4.0(Hz) |
| Displacement of control mass | ±35 (mm)    |

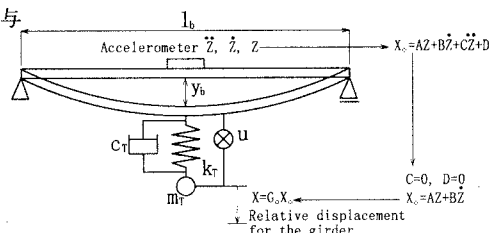


Fig.1 Analytical model of hybrid system

5. 解析結果 5.1 中央走行時の動的応答

中央走行時について、桁変位の応答波形の例をFig. 2に示す。動的応答解析結果の動的成分の特性が実験値を再現し、ハイブリッド制御の制振効果が確認できる。2乗平均値を桁加速度、桁変位について Fig. 3に示す。解析値が実験値の走行速度による変化を再現し、桁の振動が走行速度3.68m/s付近で最も大きくなり、車両重量の増加と共に大きくなる傾向が確認できる。これらより、実験での状況を解析でも再現できることが分かる。

5.2 制振効果と制御力 制振効果を表すために非制御時に対する制御時の応答の2乗平均値の比をFig. 4に示す。ハイブリッド制御の制振効果が走行速度により変化することが分かる。各速度での制御力の最大値をFig. 5に示す。最大制御力は車両重量や走行速度の増加に伴い大きくなり、その値は車両重量 $W_v$ が28.4kgfで、20N~35N程度であり、 $W_v$ が23.4kgfで、15N~30N程度であることが示されている。これらより、最大制御力が大きくなると、解析値において制振効果が大きくなる傾向がある。

5.3 偏心走行時の動的応答 非制御時において偏心走行時と中央走行時の桁端での桁加速度の2乗平均値R. M. S.をFig. 6に示し、Fig. 7にスペクトルの例を示す。Fig. 7より偏心走行時に曲げとねじりの連成振動がおきていることが分かるが、Fig. 6より今回の模型桁では、R. M. S.において偏心走行の影響はほとんど現れていない。今後、偏心走行時のハイブリッド制御のシミュレーション解析により実験を補い、制御力の評価を行う。

Table 2 Structural properties of model girder

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| Span length                | 5.4 (m)                   |
| Cross sectional area       | 121.00 (cm <sup>2</sup> ) |
| Moment of inertia of area  | 112.16 (cm <sup>4</sup> ) |
| Weight per unit length     | 94.99 (kgf/m)             |
| Weight of control system   | 16.6 (kgf)                |
| Weight of attachment parts | 15.8 (kgf)                |
| Moment of inertia of area  | 87650 (cm <sup>4</sup> )  |
| First damping constant     | 0.10296                   |
| First bending frequency    | 2.655 (Hz)                |
| First torsional frequency  | 5.109 (Hz)                |

Table 3 Structural properties of model vehicle

|                          |      |      |
|--------------------------|------|------|
| Total weight (kgf)       | 23.4 | 28.4 |
| front axle               | 6.9  | 6.9  |
| rear axle                | 16.5 | 21.5 |
| Spring constant (kgf/cm) |      |      |
| front axle               | 0.99 | 1.02 |
| rear axle                | 2.67 | 3.65 |
| Natural frequency (Hz)   | 3.12 | 3.10 |
| Logarithmic decrement    | 0.56 | 0.31 |

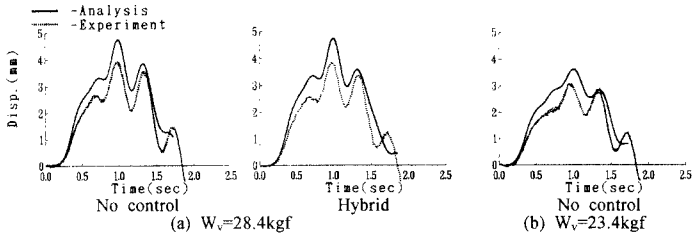


Fig.2 Dynamic response of displacement of model girder(v=3.24m/s)

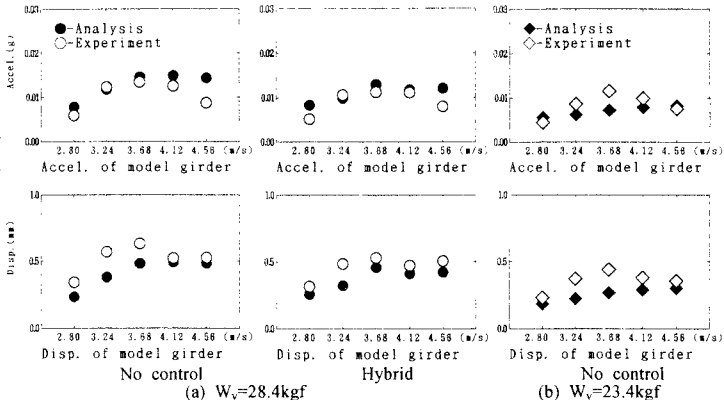


Fig.3 R.M.S. of dynamic response under moving vehicle

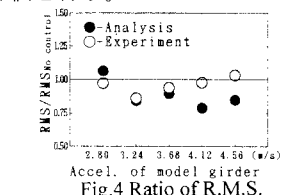


Fig.4 Ratio of R.M.S.

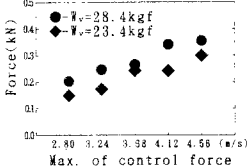


Fig.5 Max. of control force

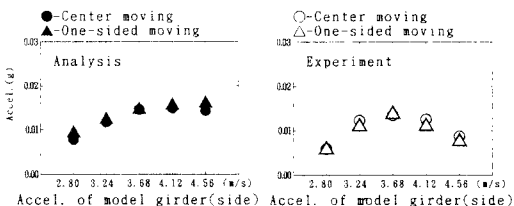


Fig.6 R.M.S. of center moving and one-sided moving

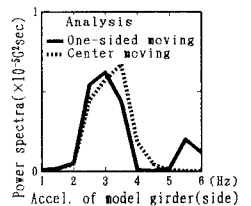


Fig.7 Power spectra(v=3.24m/s)

参考文献

1) 土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会：交通荷重による橋梁振動に関する研究の現状と課題，1994.4.  
2) 川谷充郎・山田靖則・下野正人・清水計成・森淳彦：桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験，構造工学論文集，Vol.41A，pp.683-690,1995.3.  
3) 川谷充郎・清水計成・三輪宜弘・山田靖則：偏心走行荷重による桁橋の動的応答に対するハイブリッド制御模型実験，平成8年度関西支部年次学術講演会 講演概要，1-90,1996.5  
4) Mitsuo KAWATANI, Yasunori YAMADA, Kazunari SEIKI, Yoshihiro MIWA: MODEL TESTS OF HYBRID CONTROL FOR DYNAMIC RESPONSE OF GIRDER BRIDGE UNDER ONE-SIDED MOVING LOAD, 2nd International Workshop on Structural Control, pp.263-271, December 1996, Hong Kong.