

桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験

MODEL TEST OF HYBRID CONTROL FOR TRAFFIC-INDUCED VIBRATION OF GIRDER BRIDGES

川谷充郎*, 山田靖則**, 下野正人***, 清木計成***, 森 淳彦****

Mitsuo KAWATANI, Yasunori YAMADA, Masato SHIMONO, Kazunari SEIKI and Atsuhiko MORI

- * 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)
 ** 高田機工(株)設計部橋梁設計課長 (〒556 大阪市浪速区敷津西2-1-12)
 *** 大阪大学大学院生 工学研究科前期課程土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘2-1)
 **** (株)森技術研究所 (〒567 茨木市北春日丘1-1-33)

Experimental results of dynamic response of highway bridges under a moving test vehicle show that frequency of girder's response changes with change of velocity of the moving vehicle. Such dynamic response has transient properties, that is, amplitude and frequency change due to traveling of vehicle on bridges. It is difficult to control this kind of traffic-induced vibration by TMD (Tuned Mass Damper) of passive type. In this study, hybrid control system combining merits of passive type and active type is developed. The hybrid system is composed of a tuned mass moved by AC servomotor to follow the response of the bridge girder, which is detected by an accelerometer. Through free and forced vibration tests with a model girder, it is found that the hybrid control system is effective compared with TMD.

Key Words : traffic-induced vibration, bridge girder, TMD, hybrid control system,

1. まえがき

従来より、構造設計の主眼は、構造物本来の機能を十分に発揮できるよう安全性および経済性を確保することに置かれてきた。走行車両による道路橋の動的応答の影響は、強度設計において衝撃として扱われ、衝撃係数を用いて活荷重による応力度を割り増すことにより考慮されてきた。しかるに、近年、自動車重量の増大とそのような大型車交通量の増加に伴い、道路橋の車両走行による動的載荷あるいはそれによる動的応答が、疲労損傷や振動使用性さらに周辺への環境振動影響などの問題を引き起こしている。

これまで、構造物の振動制御は、長大橋梁や高層ビルにおいて生起確率の比較的小さい地震あるいは強風に対する動的応答の軽減を目的としてきた。ここで対象とする桁橋の交通振動は、多くの都市で毎日繰り返されている現象でありながら、その制振の恒常的な実績はいまだにない^{1)~4)}。このような振動問題とその対策は、社会の進展に伴い注目されるようになりつつある快適性の確保および橋梁環境の向上に関連し、今後さらに重要性を増すものである。

ところで、道路橋における試験車走行実験によれば、走行車両の走行速度が変わると、主桁動的応答の周波数

の変化することが分かった⁵⁾。また、このような動的応答は、振幅と周波数が車両の通過と共に変化する過渡的な応答特性を有する。この種の動的挙動を制御しようとするとき、パッシブ方式の動吸振器(TMD)では周波数の変化に対応できず、制振効果が悪くなる。そのような場合に効果的なのは、アクティブな制振装置であるが、アクチュエータ駆動のための大型動力設備を要し、通常の都市内高架橋に用いられる桁橋において、大きな設備の制振装置は適さない。そこで、筆者らは、TMDを小さなアクチュエータ駆動力で制御し、制振効果を高めるハイブリッド方式を開発してきた^{6)~7)}。

ここでは、試作した制振装置を用い、模型桁の上に模型車を走行させ、制振効果をTMDの場合と比較検討する。この際、振動および制御効果の評価物理量として、桁変位および桁加速度だけでなく、近年、環境振動影響に関わる評価量として着目されている支点反力についても検討する^{8)~9)}。

2. 制振装置の概要

2.1 ハイブリッド型制振装置

本制振装置を実橋に設置する場合は橋桁内に納まるようにコンパクトにする必要があるため、Fig. 1に示すよ

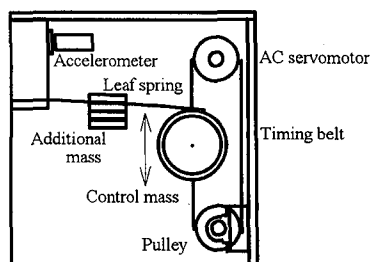


Fig. 1 Hybrid control system

Table 1 Properties of hybrid control system

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

Table 2 Properties of TMD (Tuned Mass Damper)

mass ratio $\mu = 0.0185$			
Optical target of TMD		Frequency	Damping constant
Harmonic vibration	Estimated	2.95	0.081
	Measured	2.94-2.96	0.080-0.086
Nonstationary random vibration	Estimated	2.94	0.014
	Measured	2.88-2.90	0.014-0.017

うに制振質量を板ばねで支持する片持ち梁を基本系とする。その固有振動数は橋桁のそれにほぼ一致させ、パッシブ制御にも対応させる。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。橋桁に取付けた加速度計からの出力によって、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。

2.2 振動制御システムの構成

Fig. 2の構成ブロック図に示すごとく、桁模型の中央部に本制振装置を取り付ける。桁の同一箇所に取り付けた加速度計から増幅して得た加速度 $\ddot{Z}$ 、それを積分した速度 $\dot{Z}$ 、さらに積分して得た変位 Z に、それぞれ係数C、BおよびAを乗じ、それらを加算して得た信号を制振質量の変位指令信号 X_0 ($X_0 = AZ + B\dot{Z} + C\ddot{Z}$)として用いる。この制振装置の変位指令 X_0 に対する実変位 X の周波数応答はFig. 3に示す振幅および位相特性を持ち、3Hz程度の卓越振動数を有する模型桁に対しては、一応有効な応答性があると言える。

正弦波振動について考えると、制振質量の変位 X を桁の振動速度 $\dot{Z}$ に比例させるためには、係数Bのみを最適値に設定し、係数AとCは0でよいことになる。しかし、このような制御系では、本質的に高周波数領域ほ

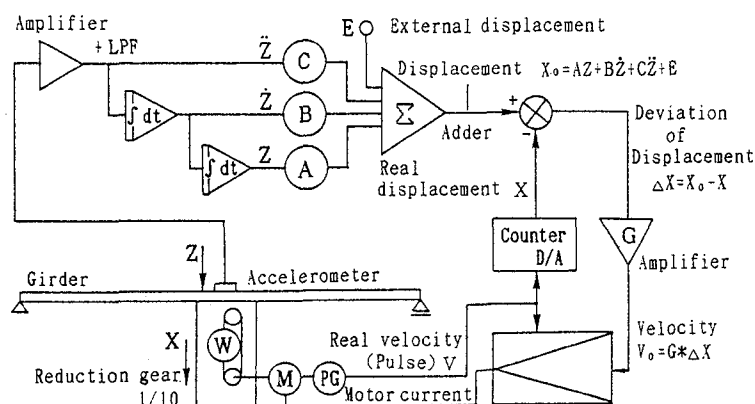


Fig. 2 Block diagram of control system

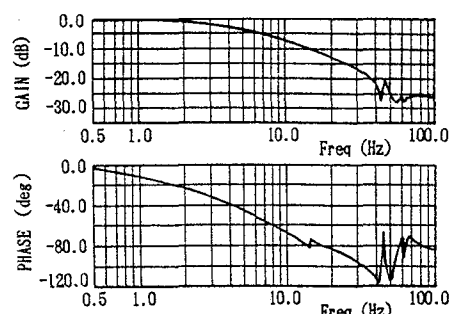


Fig. 3 Frequency response characteristics for displacement X_0

ど制御ループゲインが増加するために、必要な制御ゲインに達するまで係数Bを大きくする前に、高次の共振モードでの自励発振（スピルオーバー）に陥る傾向を常に持っている。この自励振動発生対策として、本制振装置では加速度信号増幅器にローパスフィルターを加え、高い周波数でのゲインを意図的に低下させた。もちろんこのために、桁の卓越振動数での位相遅れを生じるので、係数AあるいはCを調整して、 $\dot{Z}$ 信号に対する直角成分の信号を加算し、位相遅れを補正することができる。ここでは、係数Aのみを調整し、Cは常に0とした。つまり、本振動制御システムは変位・速度フードバック制御となっている。

2.3 パッシブ制御（TMD）

ハイブリッド型制振装置の制振質量とACサーボモータとを結合しているタイミングベルトを除去することにより、アクティブな制御力を制振質量に働かせなくすることができる。これより、本制振装置は制振質量を板ばねで支持したパッシブ型の制振装置（TMD）になる。

TMDは調和強制振動に対して最適調整を行った¹⁰⁾。すなわち、次式の同調比と減衰比により、最適振動数と最適減衰定数を算出し、それらに基づいて調整を行った。減衰の調整は電磁ダンパーによった。

$$\text{同調比: } \frac{1}{1+\mu}, \quad \text{減衰比: } \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{2(1+3\mu)}}$$

(μ : 質量比)

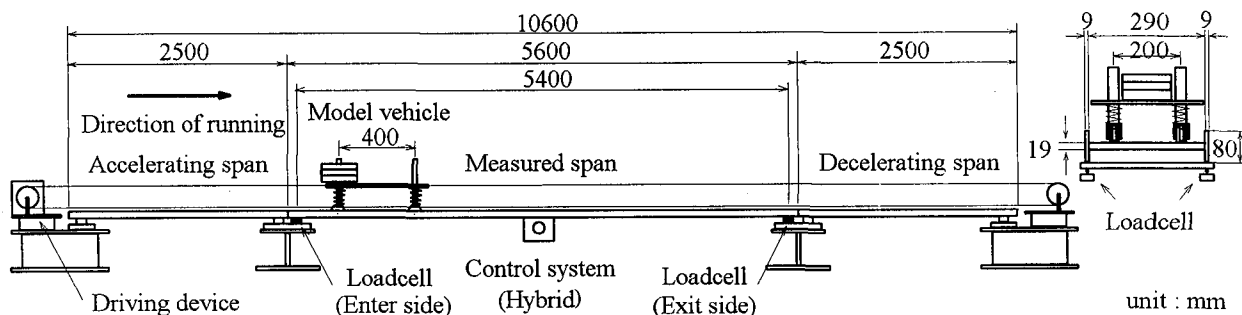


Fig. 4 General view of experiment

また、車両走行による動的応答は非定常な不規則振動であるので、参考文献¹¹⁾より質量比0.0185を基に振動数比および減衰比を推定し、TMDを非定常不規則振動に対しても最適調整を行った。これらのTMDの特性値をTable 2に示す。

3. 桁橋模型実験

3.1 模型桁

Fig. 4に示すように、鋼板をH型に組み立てた単純支持桁を3径間設け、それぞれ加速径間、測定径間、減速径間とした。測定径間の模型桁は全長5.6m、支間長を5.4mとし、その支間中央に制振装置を設置した。制振装置の重量16.21kgfを加えた模型桁の固有振動数は3.0Hzとなった。模型桁の構造諸元をTable 3に掲げる。加速径間と減速径間はそれぞれ2.5mとし測定径間で定速走行できるようにした。ウェブに幅8.0mmのレールを2本平行に200mm間隔で設置し、模型車を走行させる。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、それを相似させた¹²⁾。路面凹凸をFig. 5に示す。

3.2 模型車両

模型車走行実験では、インバータ制御ACモータによりタイミングベルトを介して模型車を走行させる駆動装置を用いた。模型車両は総重量 $w_v=18.4\text{kgf}$, 23.4kgf , 28.4kgf の3種類である。模型車両の固有振動数は、前後輪の軸重比に対してばね定数を配分し、回転に関する振動数も考慮して、固有振動数 $f_v=3\text{Hz}$ および 4Hz になるように設定した。前者は桁橋との共振を想定した。車軸と車体の摩擦を少なくするために、ベアリングを施した円筒で車軸と車体を連絡した。模型車の振動特性をTable 4に掲げる。

走行速度として、速度 $1.86\sim 4.14\text{m/s}$ (速度パラメータ: $\alpha=vT_1/2L=0.057\sim 0.127$, ここで、 v : 走行速度, T_1 : 桁の1次固有周期, L : 支間長) の範囲で6段階に変化させている。これらの速度において、測定径間上で定速走行となっている。質量移動により振動を励起させるためには、速度パラメータの値が $\alpha=0.05$ 程度必要であり¹³⁾,

Table 3 Structural properties of model girder

Span length	5.4 (m)
Cross sectional area	72.76 (cm ²)
Moment of inertia of area	97.8 (cm ⁴)
Weight per unit length	56.6 (kgf/m)
Weight of control system	16.21 (kgf)
First natural frequency	3.0 (Hz)

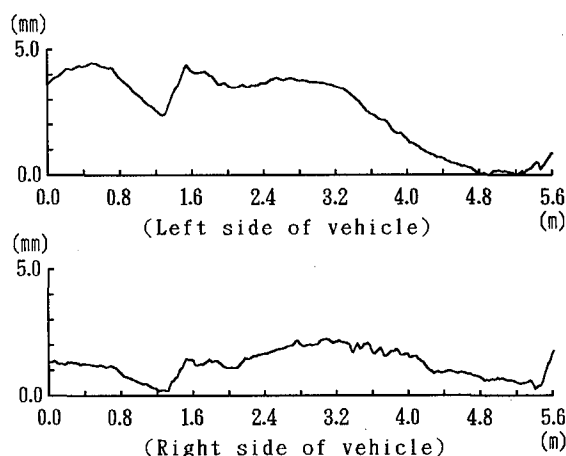


Fig. 5 Profile of road surface roughness

Table 4 Properties of model vehicle

Total weight (kgf)	18.4		23.4		28.4	
front axle	6.8		6.9		6.9	
rear axle	11.6		16.5		21.5	
Spring constant (kgf/cm)	1.00	1.77	0.88	1.61	1.02	1.81
front axle	1.86	3.30	2.71	4.83	3.65	6.50
rear axle	3.07	4.01	3.08	3.91	3.14	4.00
Natural frequency (Hz)	0.34	0.43	0.70	0.26	0.53	0.37
Logarithmic decrement						

駆動装置を用いることにより、振動を励起するのに十分な速度が得られている。

4. 実験結果

4.1 自由振動に対する制振効果

制御を加えないときと、TMD制御 (調和振動および

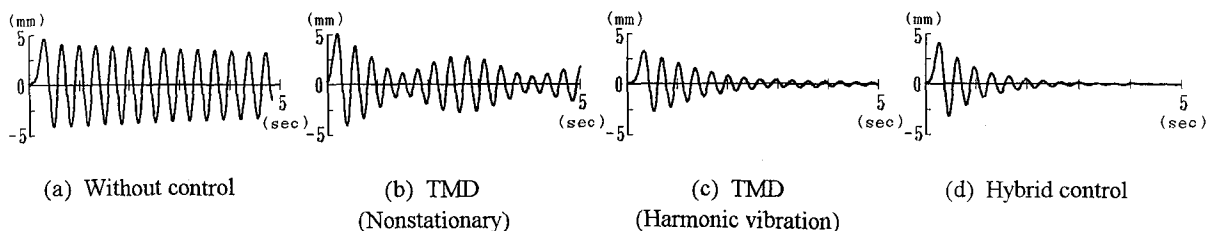


Fig. 6 Damped free vibration of model girder (Displacement of model girder)

Table 5 Frequency and logarithmic decrement

Measuring item	Amplitude (mm)	Ave. of Ampli. (mm)	Number of wave	Logarithmic decrement	Natural frequency (Hz)
Without control	4.075-2.708	3.354	21	0.019	2.954
TMD (harmonic)	2.557-0.320	1.095	8	0.276	3.125
Hybrid control	2.575-0.298	1.142	5	0.427	2.976

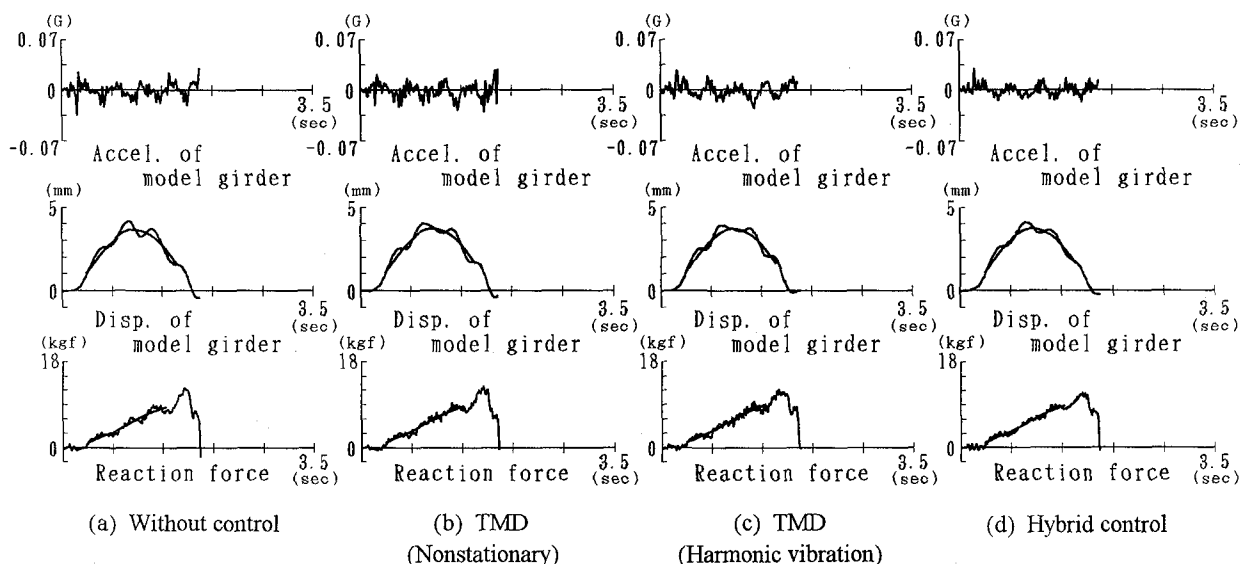


Fig. 7 Dynamic response of model girder under moving vehicle
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 3\text{Hz}$, $v = 3.23\text{m/s}$)

非定常不規則振動に対して最適化した2ケース) およびハイブリッド制御について、模型桁の自由振動を測定し、制振効果を比較した。桁の支間中央における変位の減衰自由振動波形の例を制御無し、TMD (非定常不規則振動)、TMD (調和振動)、ハイブリッド制御の順にFig. 6に示す。Table 5に自由振動実験の結果をまとめて示す。これらによりハイブリッド制御の場合、自由振動は急激に減衰し、制振効果の高いことが分かる。

4. 2 車両走行による強制振動に対する制振効果

(1) 動的応答の評価

制御無し、TMD (2ケース)、ハイブリッド制御の場合の桁橋の応答波形の例をFig. 7に示す。これらの波形から、ハイブリッド制御の場合には振幅が低減していることが分かる。このことを定量的に評価するため2乗平均値 (RMS) を算出する。支間中央の桁変位および

○ Without control ◇ TMD(Nonstationary) □ TMD(Harmonic) △ Hybrid control

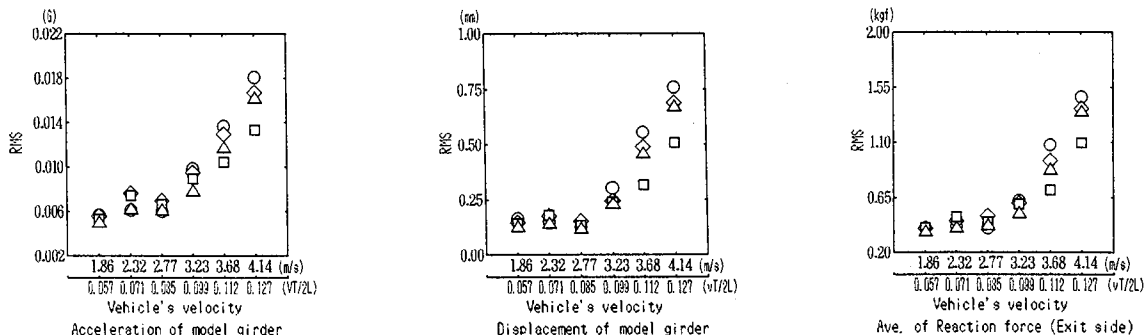


Fig. 8 R. M. S. of dynamic response under moving vehicle
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 3\text{Hz}$)

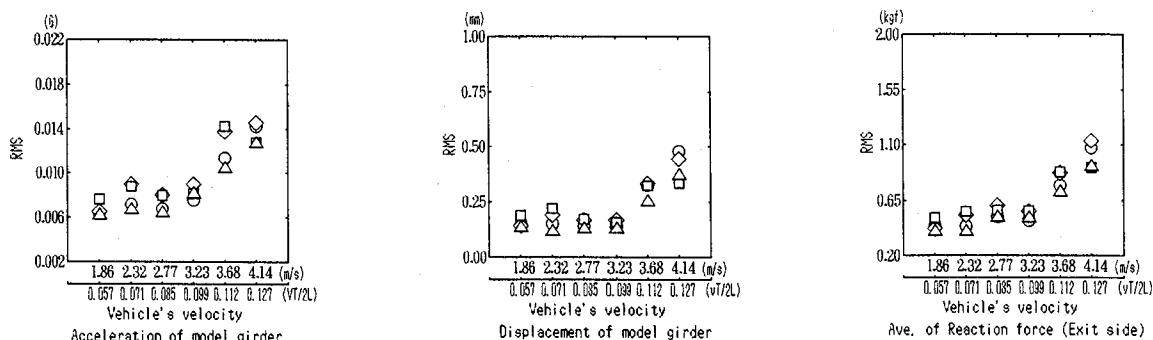


Fig. 9 R. M. S. of dynamic response under moving vehicle
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 4\text{Hz}$)

車両退出側の桁端部における支点反力について、車両が測定径間の上にある部分のデータについて、1波長分の移動平均を求めその値を推定静的応答値とし、動的成分の偏差に関する2乗平均値を求めた。

(2) 2乗平均値応答

桁加速度、桁変位および支点反力の2乗平均値の結果を、路面凹凸有り、車両重量 $w_v = 23.4\text{kgf}$ の場合で車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ と $f_v = 4\text{Hz}$ について、それぞれFig. 8とFig. 9に示す。桁加速度、桁変位および支点反力の2乗平均値は、制振時および非制振時ともに、車両の走行速度の増加にともない大きくなる。また、これらの2乗平均値は車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ の方が、 $f_v = 4\text{Hz}$ の場合より大きくなっている。これは、車両と桁の共振の影響と考えられる。

次に、車両重量の違いによる2乗平均値を、車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ の場合の桁変位に注目して、路面凹凸無しと有りについてそれぞれFig. 10とFig. 11に示す。車両重量が大きくなるほど、当然2乗平均値は大きくなる。また、路面凹凸の有る場合の方が路面凹凸の無い場合より、走行速度が大きくなると特に2乗平均値の大きくなる傾向がある。

(3) 制振効果

TMD制御およびハイブリッド制御における2乗平均値を非制御における2乗平均値の割合で示し、制振効果を表した。路面凹凸有り、車両重量 $w_v = 23.4\text{kgf}$ の場合で、車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ と $f_v = 4\text{Hz}$ について、それぞれFig. 12とFig. 13に結果を示す。桁加速度、桁変位および支点反力においてTMDよりもハイブリッド制御の方が制振効果が高いことが分かる。また、TMD制御よりもハイブリッド制御の方が走行速度の変化に伴う制振効果のばらつきが少なく一定の制振効果が得られることが分かる。ここで、Fig. 12とFig. 13に対応する場合の加速度応答について、非制御時、TMD制御時(2ケース)、ハイブリッド制御時の応答スペクトルをFig. 14とFig. 15に示す。車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ の場合のように、桁と車両の振動数がほぼ一致しているときは、走行速度が大きいときにはTMDにおいても卓越周波数応答を抑えていて、制振効果が少しある。一方、車両振動数 $f_v = 4\text{Hz}$ の場合には、TMD制御において、桁の固有振動数付近の応答は抑えられているが、車両振動数の4Hz付近の応答が卓越するようになり、TMDの制振効果が悪くなることが分かる。

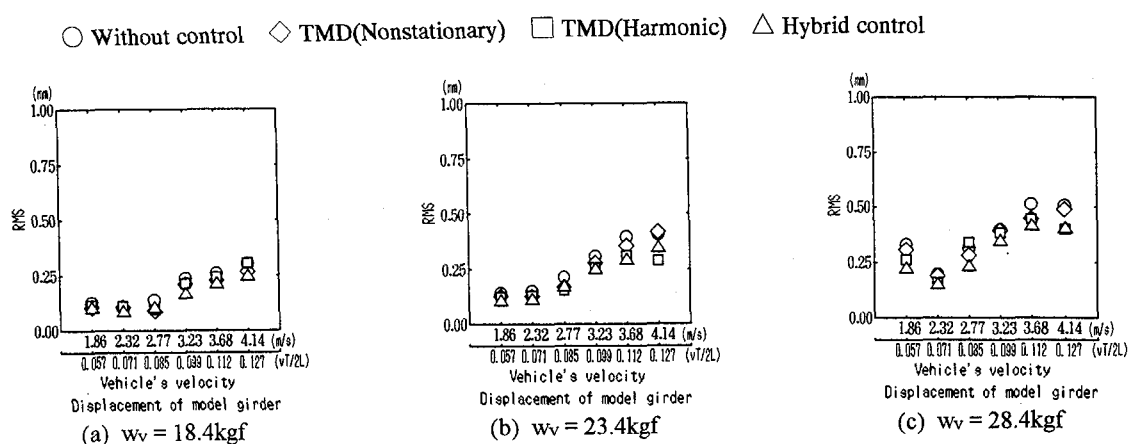


Fig. 10 R. M. S. of dynamic response under moving vehicle
(Without roughness, $f_v = 3\text{Hz}$.)

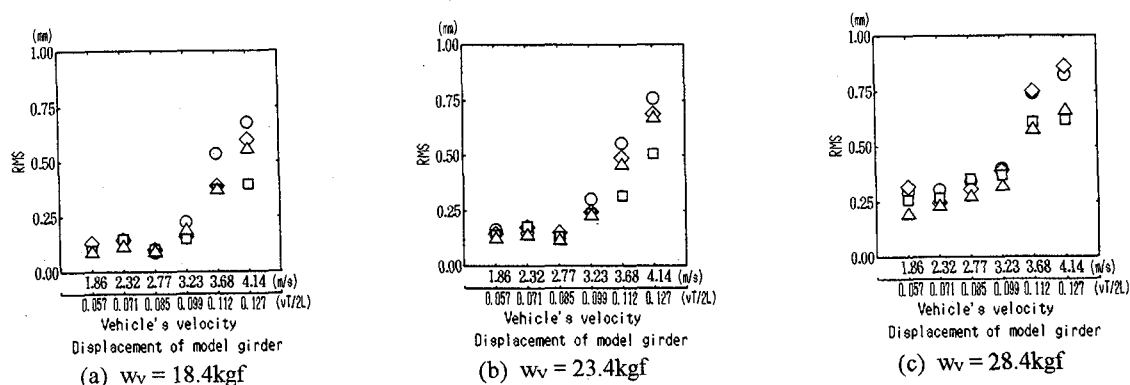


Fig. 11 R. M. S. of dynamic response under moving vehicle
(With roughness : 1/20, $f_v = 3\text{Hz}$.)

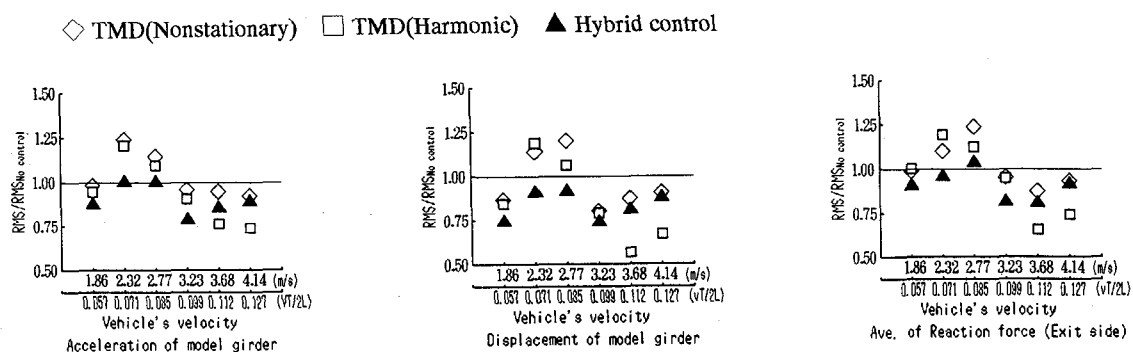


Fig. 12 Ratio of r. m. s. under control system to r. m. s. without control
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 3\text{Hz}$)

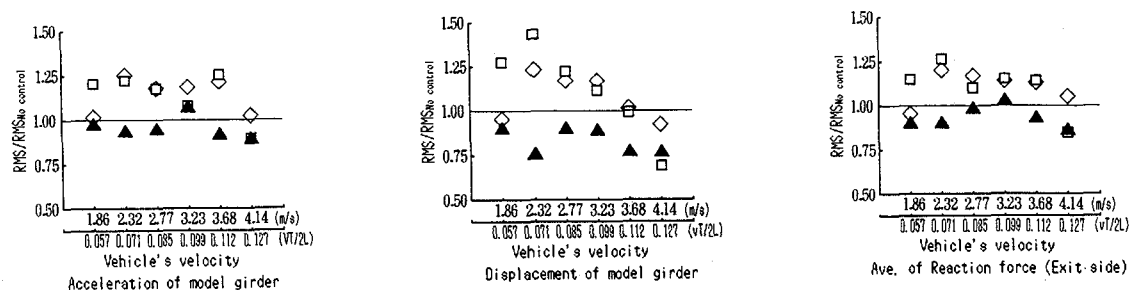


Fig. 13 Ratio of r. m. s. under control system to r. m. s. without control
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 4\text{Hz}$)

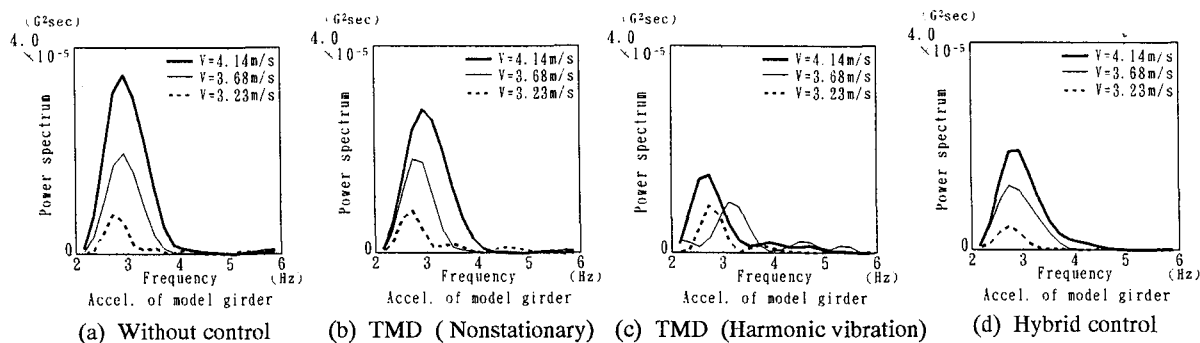


Fig. 14 Power spectrum with acceleration of model girder
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 3\text{Hz}$)

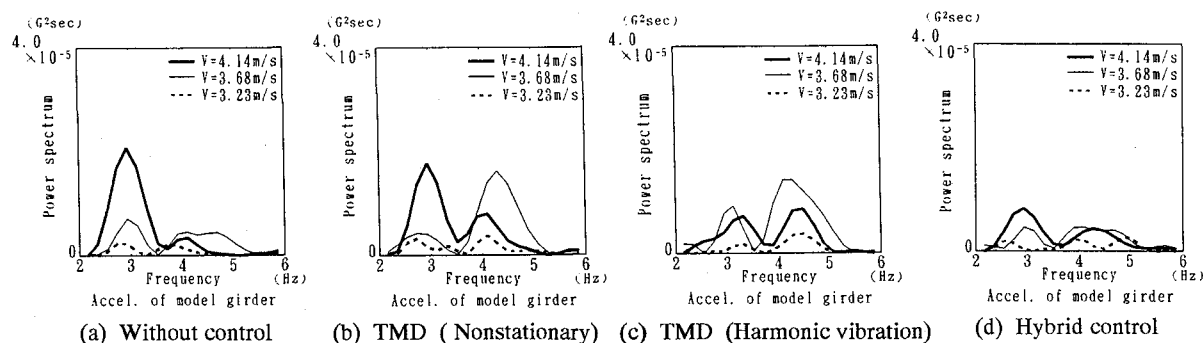


Fig. 15 Power spectrum with acceleration of model girder
(With roughness : 1/20, $w_v = 23.4\text{kgf}$, $f_v = 4\text{Hz}$)

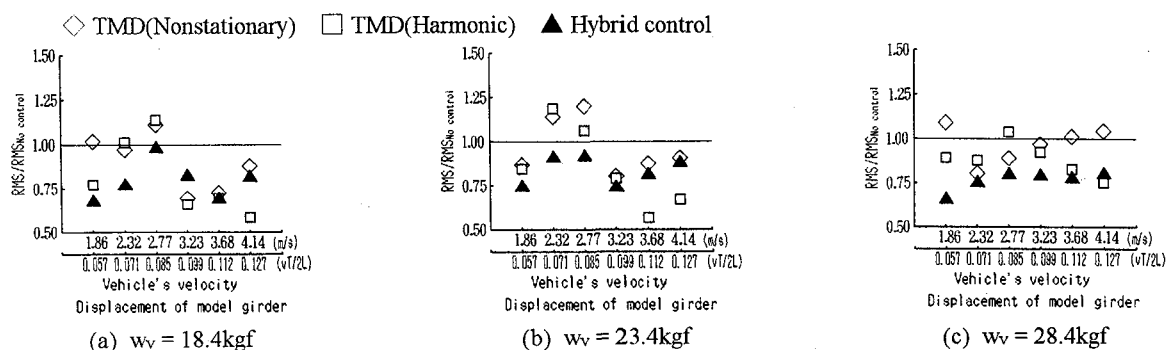


Fig. 16 Ratio of r. m. s. under control system to r. m. s. without control
(With roughness : 1/20, $f_v = 3\text{Hz}$)

Fig. 12およびFig. 13より、ハイブリッド制御は、桁変位について最も制振効果が高く、2乗平均値を8割程度に抑えていることが分かる。支点反力に注目してみると、桁加速度および桁変位と同様に走行速度の変化に伴い制振効果が変動し、桁変位における制振効果より悪くなる。

車両重量の違いによる制振効果の比較を、路面凹凸有り、車両振動数 $f_v = 3\text{Hz}$ の場合の桁変位について、Fig. 16に示す。ハイブリッド制御において、外力である車両重量の大きい方が走行速度による制振効果の変動が小さく、同じ制振質量で車両重量が小さい場合と同様の制振効果があることが分かる。

5. 結論

本研究では、道路橋の交通振動について、車両条件の変化および路面凹凸の有無によって、非制振時に対するパッシブ制御 (TMD) とハイブリッド制御の制振効果を比較検討した。ハイブリッド制御の制振効果は入力エネルギーによって変化するが、ここでは、質量比0.0185という現実的なTMDに対して、その制振質量を駆動するに限界のモーターを使用している (Fig. 3の周波数応答より判断される)。そのとき、環境振動影響に関わる物理量として、桁変位および桁加速度だけでなく、支点反力の変動についても着目した。

- (1) 2乗平均値は速度と共に大きくなる傾向にある。また、車両振動数 $f_v=3\text{ Hz}$ の場合の方が $f_v=4\text{ Hz}$ の場合よりも大きく、桁との共振によるものと考えられる。
- (2) パッシブ制御(TMD)は、車両の走行速度の変化に伴う制振効果のばらつきが大きく、振幅と周波数が速度と共に変化する応答の制御には適さない。
- (3) ハイブリッド制御は、桁加速度、桁変位および支点反力に対してTMDよりも良い制振効果がある。また、桁変位において最も良い制振効果が得られる。支点反力に関する制振効果は桁変位における制振効果より悪い。
- (4) 車両重量が大きくなると、制振効果の走行速度による変動が小さく、車両重量が小さい場合と同程度の制振効果が得られた。

参考文献

- 1) 上前行孝・徳良賢一・高橋敏介・飯島啓秀：橋梁振動の制御装置開発に関する基礎的研究(上), (下), 橋梁と基礎, Vol. 16, No. 12, pp. 10-12, 1982. 12, Vol. 17, No. 1, pp. 16-22, 1983. 1.
- 2) 矢作 枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール, 土木学会論文集, 第365号/I-3, pp. 435-444, 1985. 4.
- 3) 梶川康男・沖野 真・宇藤 滋・松浦康夫・伊関治郎：動吸振器による高架橋の振動軽減対策, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 585-595, 1989. 3.
- 4) 横山功一・澤田憲文・岩津守昭・澤登善誠・右近大道・伊関治郎：動吸振器による道路橋の交通振動の軽減対策について, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 815-823, 1992. 3.
- 5) 難波宗行・川谷充郎・林 秀侃・中村一平・西星 匡博：各種短支間道路橋における自動車走行実験, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, I-375, 1990. 9.
- 6) Mitsuo Kawatani, Seiji Nishiyama and Atsuhiko Mori: Model Tests of Hybrid Control System for Bridge Vibration under Moving Vehicles, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 41, pp. 21-27, 1992.
- 7) 川谷充郎：交通振動制御の可能性-Ⅲ. アクティブコントロール, その他-, 第2回振動制御コロキウム PART A 構造物の振動制御(2), pp. 203-210, 1993. 8.
- 8) 比江島慎二・藤野陽三：粘性ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減に関する2, 3のシミュレーション, 第2回振動制御コロキウム PART B 講演論文集, pp. 159-166, 1993. 8.
- 9) 山田靖則・川谷充郎：実橋における動的反力の測定と橋梁の交通振動評価パラメータに関する考察, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 713-720, 1994. 3.
- 10) Den Hartog, J. P. : Mechanical Vibration, Section 3.3 The Damped Vibration Absorber, Dover Publications, Inc., pp. 93-106, 1985.
- 11) 岡林隆敏・竹下 渡：走行車両による道路橋振動制御のための動吸振器の最適設計, 振動制御コロキウム PART B 講演論文集, pp. 97-104, 1991. 7.
- 12) 川谷充郎・西山誠治：路面凹凸を考慮した道路橋の走行車両による動的応答特性, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 733-740, 1993. 3.
- 13) Norris, C. H., Hansen, R. J., Holley, Jr. M. J., Biggs, J. M., Namyet, S. and Minami, J. K. : Structural Design for Dynamic Loads, Chapter 19 Vibration of Girders Under Moving Traffic Loads, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 416-433, 1959.

(1994年9月14日受付)