

動吸振器による道路橋の交通振動の軽減効果について

A FIELD TEST OF TUNED MASS DAMPER FOR REDUCING TRAFFIC-INDUCED VIBRATION OF HIGHWAY BRIDGES

横山功一^{*1}・澤田憲文^{*2}・岩津守昭^{*3}・澤登善誠^{*4}・右近大道^{*5}・伊関治郎^{*6}

BY Koichi YOKOYAMA, Norifumi SAWADA, Moriaki IWATHU, Yoshinobu SAWANOBORI, Hiromichi UKON
and Jiro ISEKI

Traffic-induced vibration is one of the environmental problems at present. Tuned Mass Damper (T.M.D.) is often used mainly to reduce harmonic vibrations of buildings and long span bridges due to strong wind. Some numerical simulations suggest that T.M.D is not effective enough to reduce random vibration such as traffic-induced vibration of highway bridges. A field test was carried out at P.W.R.I to study effectiveness of T.M.D to reduce traffic-induced vibration of highway bridges. This paper presents test results with a vibration exciter and with moving tracks on the bridge.

1. まえがき

走行する車両が加振源となる道路交通振動は、交通騒音や大気汚染と並んで道路公害の1つとして大きな社会問題となっている。なかでも、交通振動の問題は現象が複雑なこともあり、特に高架橋の交通振動は、舗装面の凹凸だけでなく、桁や伸縮継手、橋脚、基礎など振動発生要因が複雑に関係していることから対策を一層困難にしている。現在までの高架橋の振動軽減対策として、高架構造面からの対策、伝搬経路対策、受振点対策など様々な面から検討されているが、有効かつ実用的な振動軽減対策については、未だ結論が得られていないようである。

近年、高架構造面からの対策の一つとして動吸振器 (Tuned Mass Damper; 以下「TMD」と言う) の設置による交通振動軽減対策が検討されている^{1) 2) 3)}。TMDは適切な値をもつ弾性ばねと粘性減衰機構を備えた付加質量を主振動系に取り付け、その連成振動によって主振動系の振動軽減を図るものであり、土木分野では風による振動に対して広く用いられるようになって来ている。

しかし、風による振動は定常でかつ正弦波に近い性質を持っておりTMDが有効であるが、これに対し交

-
- | | | | |
|----|----|-----------------------|----------------------------|
| *1 | 工修 | 建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室長 | (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地) |
| *2 | | 建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室研究員 | (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地) |
| *3 | | 阪神高速道路公団 保全施設部調査役 | (〒541大阪府大阪市中央区久太郎町4丁目1番3号) |
| *4 | | 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課 | (〒541大阪府大阪市中央区久太郎町4丁目1番3号) |
| *5 | | (株)長大 長大橋部専門技師 | (〒305 茨城県つくば市春日3丁目2番6号) |
| *6 | | オイレス工業(株) 技術2部長 | (〒252神奈川県藤沢市桐原町8番地) |

通振動は過渡的な応答を示し、振動成分も比較的幅広いものとなっており、TMDの適用には問題点が多いことが指摘されている⁴⁾。

交通振動に対するTMDの適用性に関する現在までの研究は解析的アプローチが主であるが、交通振動は自動車、橋梁の構造特性に深く関係することから、実測による交通振動の荷重特性の把握とTMDの有効性の確認が必要と考えられる。

今回、建設省土木研究所構内にある試験橋梁（単純活荷重合成桁、支間30m、幅員8.5m）に鉛直振動とねじれ振動に対応したTMD（等価質量比 $R=1/20$ ）を設置し、起振機試験及び車両走行試験によりその効果について検討した。この場合TMDは、橋梁の構造条件から3個設置することとし、外側の2個はねじれ振動に、中央の1個は鉛直振動に対応させることとした。起振機試験では、3個のTMDの振動数を変化させて橋梁の応答特性を比較した。さらに、車両走行試験では、TMDの振動数を①起振機実験結果より得られたねじれ振動と鉛直振動の両方を考慮して最適調整とした場合、②3個とも鉛直振動に対応させた場合について、それぞれ車両重量（10t、20t、30t）及び走行速度（30、60、80km/h）を変化させてTMDの制振効果を検討した。

2. 試験対象橋梁

試験の対象とした橋梁は、建設省土木研究所構内にある試験橋梁で、都市高速道路に通常用いられる構造、諸元と同じ支間30m、幅員8.5m、4本のI型主桁からなる単純活荷重合成桁である（図-1、表-1）。

本試験を実施する前に、常時微動測定ならびに乗用車3台の連行走行（30km/h）による車両走行試験を実施し、橋梁の固有振動数を把握した。その結果、TMD設計のための卓越振動としては、鉛直たわみ1次の卓越振動数は4.4Hz、減衰定数 h は1.3～2.2%、ねじれ1次の卓越振動数は5.5Hz、 $h=0.3\sim1.1\%$ が得られた。また、常時微動測定及び車両走行試験結果では鉛直たわみ1次振動よりねじれ1次振動の方が卓越していたことが注目される。

3. TMDの製作

TMDの振動質量が大きいほど振動軽減効果があるものの、桁の構造寸法等の制約からTMDと上部工の等価質量比 R は1/20程度が実用上の上限と思われる。このため、本試験では、1個当りの等価質量比 $R=1/60$ のTMDを4本の主桁の間に3個設置することとした。対象振動としては、ねじれ振動が比較的大きい橋梁であるため、外側2個のTMD①、③をねじれ振動用に、中央のTMD②を鉛直たわみ振動用に調整することにした。

3.1 鉛直振動用TMD

鉛直振動用TMD②の諸元は次のとおりとした。

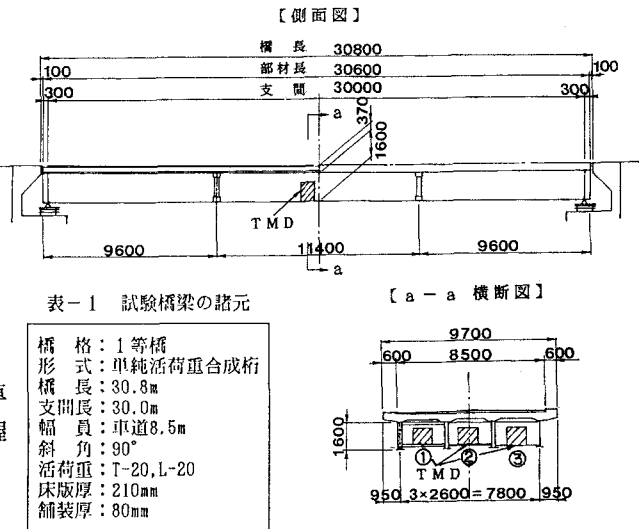


図-1 橋梁断面図（単位：mm）

①振動重量 $W=2.33\text{ t}$ （等価質量比 $R=1/60$ ）

②ばね定数 K については、橋梁にTMDが付加されることにより橋梁の振動数が変化する。すなわち、TMD（2個）の振動重量（ $2 \times 2.33\text{ t} = 4.66\text{ t}$ ）とさらに架台及び容器の重量（約 3.0 t ）が付加されることにより橋梁の鉛直1次振動数は $4.4 \rightarrow 4.29\text{ Hz}$ に変化する。またTMD②と桁の振動数比 β は2自由度系による試算を行った結果（図-2参照）、98%が最適であることからTMD②の設計に用いた固有振動数は $0.98 \times 4.29 = 4.2\text{ Hz}$ とした。また、図-2よりTMD②の減衰定数 h は8~12%程度が望ましいこと、ダンパーは温度変化に伴い減衰定数が変化することを考慮し、常温 15°C において $h=12\%$ （供用温度 -5°C では $h=16.9\%$ 、供用温度 35°C では $h=8.5\%$ ）を選んだ。

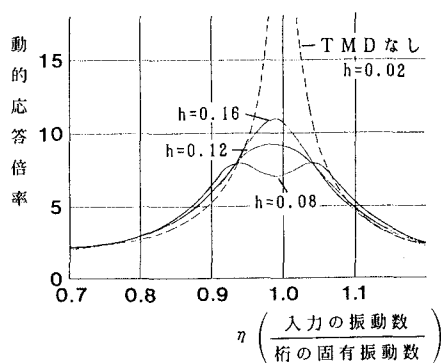


図-2 周波数応答（ $R=1/60$, $\beta=0.98$ ）

3.2 ねじれ振動用TMD

ねじれ振動用TMDの振動重量は鉛直振動用TMD②と同様とした（ $W=2.33\text{ tf}$ ）。

試験橋梁を一自由度のねじれ振動にモデル化したときの等価回転慣性と計算上得られるねじれモードの試験橋梁全体の回転慣性との比は $1/2.4$ であり、鉛直たわみ振動における等価質量と橋梁全質量との比 $1/2$ と概ね対応している。したがって、鉛直たわみ振動での検討結果はそのままねじれ振動に適用できるものとした。阪神高速道路公団らによるTMDの研究結果⁵⁾によると、鉛直振動対策として等価質量比 $R=1/20$ とした場合のTMDと桁の振動数比 β は95%が最適であることがわかっている。TMD①、③の等価回転慣性の比は $1/20$ であることから、TMD①、③の設計に用いた固有振動数は鉛直振動による検討結果を適用できるものとして $0.95 \times 5.5 = 5.2\text{ Hz}$ とした。

また、前述の阪神高速道路公団らによるTMDの研究結果によると、 $R=1/20$ での減衰定数 h は16%が有利であることから、TMD①、③の減衰定数 h も常温 15°C において16%（供用温度 -5°C では $h=22.6\%$ 、供用温度 35°C では $h=11.3\%$ ）を選んだ。

3.3 TMDの製作

以上の結果より、基本となるばね定数を決定し、TMDの製作に当たっては、ばねは3種類からなるものとし（図-3参照）、ばねCを変える（ $K=0 \sim 144\text{ kg/mm}$ ）ことによりTMDのばね定数を変更可能（ $\Sigma K=140 \sim 284\text{ kg/mm}$ ）となるような構造とした。

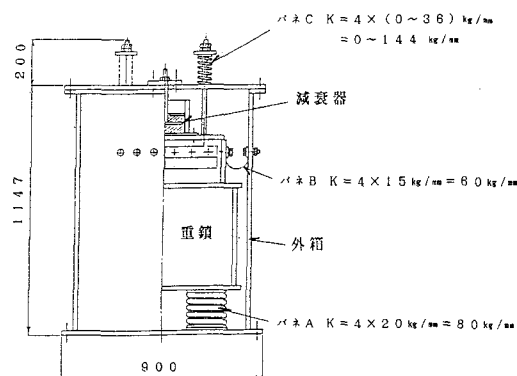


図-3 TMD概略図（単位：mm）

4. 起振機試験

TMDの振動数の違いによる制振効果を検討するため、 15 ton 2連式起振機を用いて、起振機試験を行った。起振機試験における試験条件を表-2に示す。鉛直振動に対するTEST No.4とNo.5は、ねじれ振動用TMDの影響を調べることに、また、ねじれ振動に対するTEST No.10とNo.11は、鉛直振動用TMDの影響を調べるこ

とを目的とした。

表一 起振機実験での実験条件

鉛直振動に対する検討					ねじれ振動に対する検討				
TEST NO.	T M D の振動数			備 考	TEST NO.	T M D の振動数			備 考
	TMD ① (ねじり振動用)	TMD ② (鉛直振動用)	TMD ③ (ねじり振動用)			TMD ① (ねじり振動用)	TMD ② (鉛直振動用)	TMD ③ (ねじり振動用)	
1	無	無	無	—	8	無	無	無	—
2	5.3 Hz	4.15 Hz	5.3 Hz	$\beta \approx 99\%$ (4.15Hz)	9	5.3 Hz	4.15 Hz	5.3 Hz	$\beta \approx 100\%$ (5.3 Hz)
3	5.0	4.1	5.0	$\beta \approx 98\%$ (4.1 Hz)	10	5.0	4.1	5.0	$\beta \approx 94\%$ (5.0 Hz)
4	5.0	3.9	5.0	$\beta \approx 93\%$ (3.9 Hz) TESTNO.11と同じ	11	5.0	3.9	5.0	$\beta \approx 94\%$ (5.0 Hz) TESTNO.4と同じ
5	4.75	3.9	4.75	$\beta \approx 93\%$ (3.9 Hz) TESTNO.12と同じ	12	4.75	3.9	4.75	$\beta \approx 90\%$ (4.75Hz) TESTNO.5と同じ
6	5.0	3.8	5.0	$\beta \approx 90\%$ (3.8 Hz)					
7	5.0	3.65	5.0	$\beta \approx 87\%$ (3.65Hz)					
(参考) 橋梁の固有振動数 4.2 Hz ⁽¹⁾					(参考) 橋梁の固有振動数 5.3 Hz ⁽¹⁾				

注 1: 起振機+TMD (クランプ状態)での常時微動測定結果

起振機試験結果について図-4(a)に外桁における鉛直加振時の共振曲線を、図-4(b)に外桁におけるねじれ加振時の共振曲線を示す。また、図-5に共振曲線の最大値を比較した結果を示す。その結果、鉛直加振では約4.0~5.3Hzの範囲において応答値が低下しており、TMD②の振動数を $\beta = 99\%$ (4.15Hz) ~ $\beta = 87\%$ (3.65Hz)の範囲で変化させるとTMD無しに対する最大応答倍率の比は、9割~7割程度に減少し最も制振効果が大きかったのは $\beta = 93\%$ (3.9Hz)のときであった。また、ねじれ加振では約5.2~6.0Hzの範囲において応答値が低下しておりTMD①、③の振動数を $\beta = 100\%$ (5.3Hz) ~ $\beta = 90\%$ (4.75Hz)の範囲で変化させてもTMD無しに対する最大応答倍率の比は、あまり変化がなく約5割程度に減少した。鉛直振動に対する制振効果がねじれ加振に比べて小さいのは、鉛直振動用TMDは1個 (等価質量比 $R=1/60$)であったためだと考えられるものの、TEST No.4とNo.5を比較すると、TMD①、③の振動数が鉛直卓越振動数3.9Hzに近いTEST No.5 (4.75Hz)の方がTEST No.4 (5.0Hz)より制振効果が大きく、ねじれ振動用のTMDは鉛直振動用TMDとの振動数に約2割程度の差があっても制振効果に寄与することが分かった。また、図-4(a), (b)の共振曲線より減衰定数 h を求めると、TMDを設置することにより鉛直たわみ振動では $h \approx 6.7\% \rightarrow 8.4\%$ に、ねじれ振動では $h \approx 4.1\% \rightarrow 4.4\%$ に増加した。

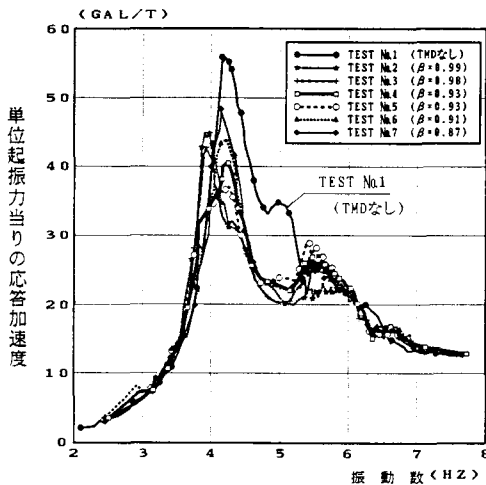


図-4 (a) 鉛直加振時共振曲線

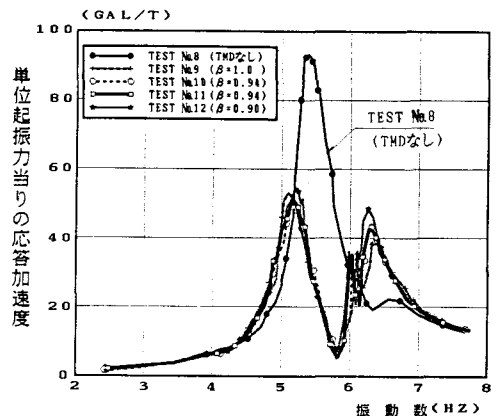


図-4 (b) ねじれ加振時共振曲線

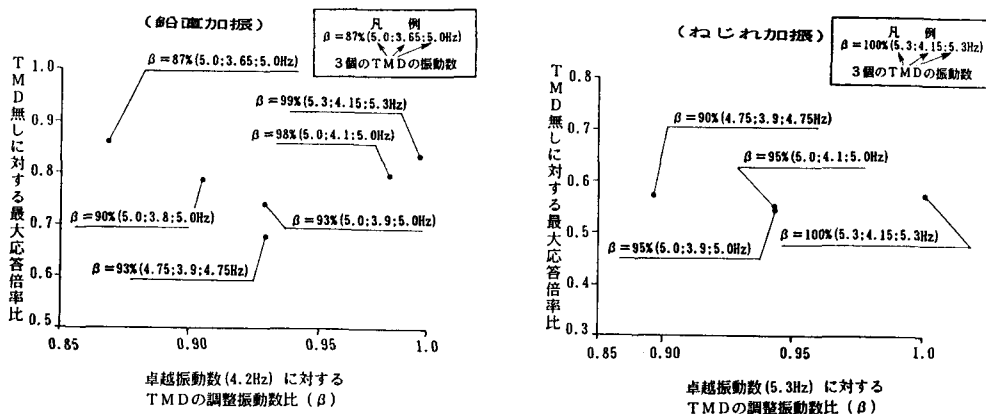


図-5 応答倍率比と振動数比率の関係

5. 車両走行試験

5.1 車両走行による橋梁の応答

車両走行試験における試験条件を表-3に示す。試験に用いた車両は前1軸、後2軸の3軸大型ダンブトラックであり、積載荷重を変えることにより車両重量を10tf（空荷）、20tf（10tf積荷）、30tf（20tf積荷）と変化させた。

表-3 車両走行試験での実験条件

TEST No.	TMDの種類	車両重量 (t)	走行速度 (km/h)	段差の有無
13	無	20	30, 60	有 (H=8mm)
14	無	10, 30	30, 60, 80	無
15	TMDI ¹⁾	20	30, 60	有 (H=8mm)
16	TMDI	10, 20, 30	30, 60, 80	無
17	TMDII ²⁾	20	30, 60	有 (H=8mm)
18	TMDII	10, 20, 30	30, 60, 80	無

注) *1: TMD①, ③=5.1 Hz TMD②=3.95 Hz

*2: TMD①, ②, ③=3.65 Hz

(1) 応答加速度波形及び最大応答加速度

図-6に走行車線走行時の外桁（G1桁）スパン中央の鉛直方向変位と加速度波形の一例を示す。変位波形は移動平均法により車両による静的変位を分離し、取り除いてある。この図より一般に高速走行時ほど振動波形は非正常性を強めており、TMD適用上の制約になると考えられる。また、最大加速度が生じるのは

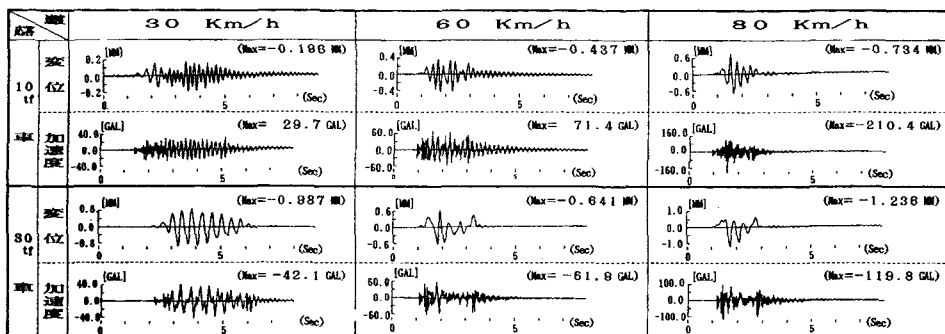


図-6 車両走行時の桁の応答

必ずしも車両位置が桁中央の時ではなく、桁端のエキスパンション・ジョイントへの進入、退出時にも生じており、この傾向は走行速度が高いときほど顕著である。交通振動の評価には加速度を人体感覚補正した振

動レベルが用いられるため、TMDの対象とする桁全体の振動以外の要因の影響も大きいことに注意が必要である。

次に、3回走行した最大応答加速度の平均値を表-4に示す。

表-4より、段差ありの場合または走行速度が速くなるとジョイント通過時に発生する最大応答加速度は、TMDの有無に関わらず大きくなる傾向にある。

表-4 最大応答加速度の平均値

	速度30km/h	速度60km/h	速度80km/h
車両10tf 段差無し	32 gal (23) [23]	68 gal (65) [70]	190 gal (158) [124]
車両20tf 段差有り (H=8mm)	35 (45) [38]	65 (103) [101]	
車両30tf 段差無し	46 (38) [38]	71 (75) [77]	114 (127) [123]

注 1) 上段は、TMD無しの場合
2) 中段()は、TMDⅠの場合
3) 下段[]は、TMDⅡの場合

(2) 卓越振動数

図-7にG1桁中央の加速度のパワースペクトルを計算し、応答の卓越振動数を調べた結果を示す。10tf車走行時にはねじれ振動($f_n=5.5\sim 5.7\text{Hz}$)が顕著であり、一方30tf車走行時には桁の固有振動ではなく、車両の固有振動数と推定される低い振動数成分が顕著である。また、走行速度により応答の卓越振動数成分が変化する。パワースペクトルより得られた3回走行した卓越振動数の平均値及びそのときの最大値の平均値と走行速度の関係を図-8に示す。図-8より、車両重量が10tfの場合にはパワースペクトルの最大値は大きい傾向にあり、特に速度が速くなるにつれて最大値の増加が著しい。理由としては、パワースペクトル図より試験車両のばね上振動数は、10tf車で3.7~4.4Hz、20tf車で2.9~3.4Hz、30tf車で2.4~2.6Hzと推定され、橋梁の固有振動数(鉛直振動で4.25Hz、ねじれ振動で5.4Hz)に近い10tf車で振動が大きくなったものと考えられる。

車両重量10tfの場合、卓越振動数は走行速度が30、60km/hでは約6Hz以下であるものの、走行速度が80km/hになると、車両のばね下振動数と推定される約16Hzが卓越していた。

車両重量10tfの場合、卓越振動数は走行速度が30、60km/hでは約6Hz以下であるものの、走行速度が80km/hになると、車両のばね下振動数と推定される約16Hzが卓越していた。

(3) 車両条件と振動のレベル

車両重量、走行速度と桁応答との関係は次のように整理できる。

- a) 車両重量の増加に伴い車両のばね上固有振動数は低下し、この振動数成分で桁を振動させる。
- b) 車両の固有振動数が桁の固有振動数と一致すると共振するが、それは走行速度が低いときに顕著に現れる。しかし、共振しない場合でも振動のレベルは大きい。

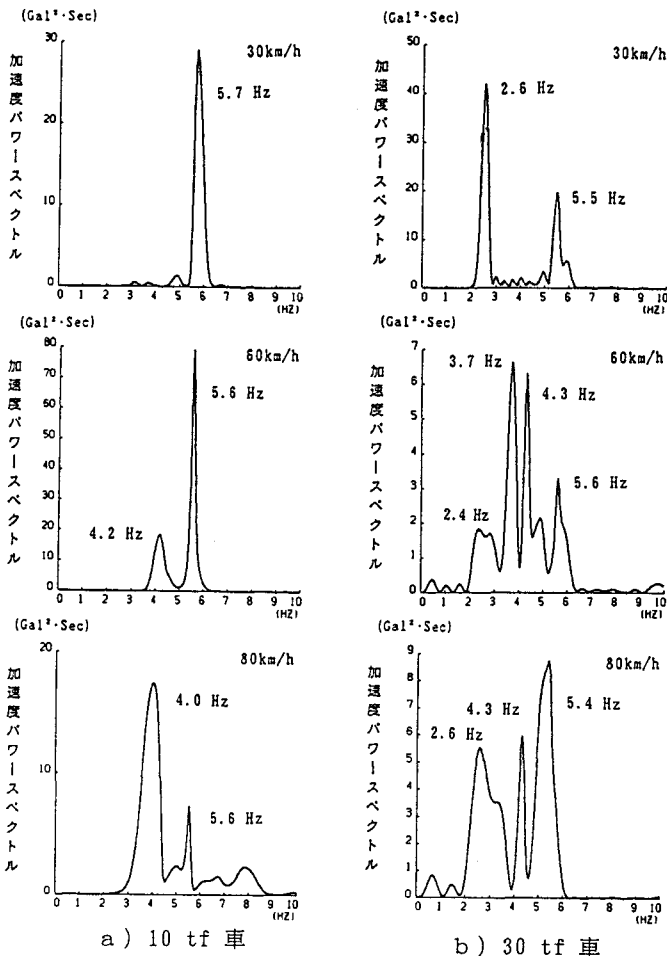


図-7 桁の応答のパワースペクトル

c) 高速走行時(80km/h)には車両からの振動外力はエキスパンション・ジョイントの不陸により衝撃的になり、桁の応答振動数成分もやや幅広になる。

5.2 TMDの制振効果

TMDによる桁の制振効果のスケールとして応答変位あるいは加速度の最大値とパワースペクトルを取り上げ以下に考察した。またTMDの最適調整についても検討した。

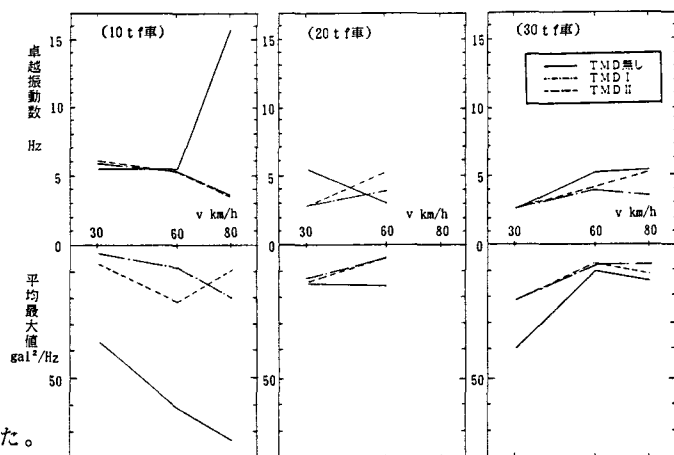


図-8 パワースペクトル最大応答値及び卓越振動数と速度の関係

(1) 最大応答値

図-8に見られるように、TMDを設置することにより、およそ全てのケースでTMD無しに比べてパワースペクトルの最大値は小さくなった。特に、10tf車の場合にTMDの効果は大きく、TMD無しに比べて約1/3以下となった。橋梁の固有振動数に近い振動数を持つ振動源で加振された場合の方が構造物が本来持っている振動特性に近い振動となるため、TMDがより有効に作用したものと考えられる。

TMDの制振効果は、5.1で明らかにしたように桁の固有振動数成分の振動が励起される場合に特に顕著になることが予想されるので、10tf車、走行速度30km/hの場合についてTMDの有無による変位波形とそのピーク毎にピーク値を読み取り比較した(図-9, 10)。その結果、最大値が生じるピーク以降に対して振動軽減効果が大いことが明かである。参考にこの時のTMDの動きも図-9に併記して示した。

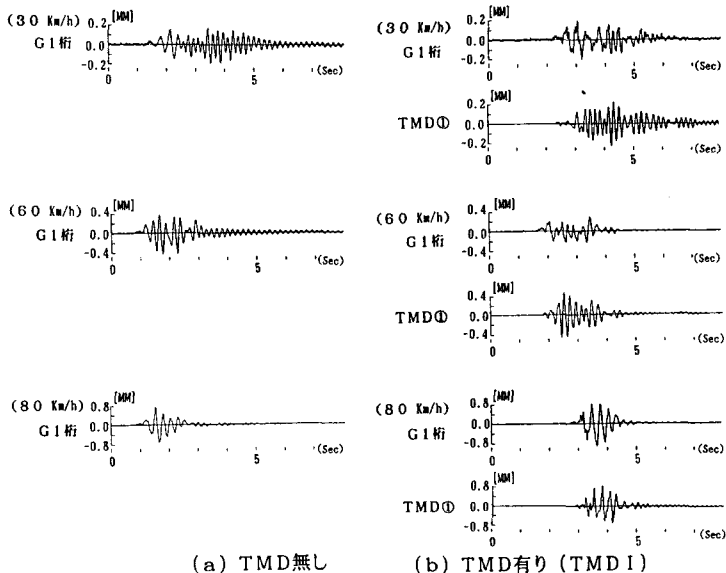


図-9 TMDの有無による桁の応答波形(10tf)

(2) パワースペクトルの面積

TMDは起振機実験結果からも分かるように2質点系にすることにより卓越振動数の最大加速度を軽減するものの、振動数によっては加速度が増加するものもある。このため、パワースペクトルの面積(Gal^2)に着目して橋梁に生じる全加速度について検討した。道路交通振動により問題とされる振動数は20Hz程度までであることから、パワースペクトルの面積(Gal^2)は、20Hzまでを対象とした。相対的に振動の大きい走行

10t車の場合を図-11に示す。図-11よりTMD無しの場合、G1桁では走行速度が速くなるとパワースペクトルの面積 (Gal^2) は増加傾向が著しい。TMDを設置することにより最も効果の大きかったのは、走行車線反対側の外桁 (G4桁) でTMD I、 $V=60\text{km/h}$ の時でありTMD無しに比べて約15%に減少した。最も効果の小さかったのは、G4桁でTMD I、 $V=80\text{km/h}$ の時でありTMD無しに比べて約65%に減少した。TMD IとTMD IIとを比較すると、低速走行 ($V=30, 60\text{km/h}$) の場合にはTMD Iの方が効果があるものの、高速走行 ($V=80\text{km/h}$) では逆の結果となった。

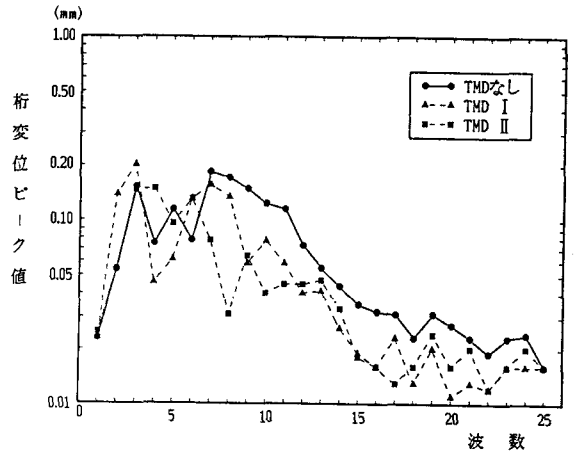


図-10 TMDの有無による桁変位ピーク値の比較

(3) TMDの調整効果

表-3のTEST No. 15, 16におけるTMDの調整振動数は、起振機撤去後 (TMD有り) の常時微動測定結果及び起振機試験結果を考慮して設定したものである。すなわち、常時微動測定結果よりTMD設置状態での橋梁の卓越振動数は、鉛直振動で4.25Hz、ねじれ振動5.4Hzであった。この卓越振動数に起振機試験結果でのTMDの最適調整振動数の比を乗じてTMD Iの調整振動数とした。その結果、鉛直振動用TMD②の振動数を $4.25\text{Hz} \times 0.93 = 3.95\text{Hz}$ 、ねじれ振動用TMD①, ③の振動数を $5.4\text{Hz} \times 0.95 = 5.1\text{Hz}$ の振動数とした。走行車両による橋梁の卓越振動数は、構造物 (橋梁) の固有振動数のみならず、加振源 (車両) の固有振動数も含まれることから、TEST No. 15, 16は、加振源の固有振動数 (ここでは、ばね上振動数を対象) に対する効果の有無に着目したものである。試験車両のばね上振動数は、3.0Hz前後と推定されるものの、TMDの最低振動数は3.65Hzであることから、TMD IIの調整振動数はTMD①, ②, ③とも全て3.65Hzとした。

これらに対する効果は図-8, 10, 11

1に示されているが、走行車両の重量及び速度の違いより制振効果は異なる。すなわち、30tf車走行時にみられるような車両の固有振動数成分が顕著な場合は (図-7参照)、TMD IとTMD IIではほとんど差はみられないが、10tf車走行時のような桁の振動が顕著な場合には (図-7参照) 効果に差がみられ低速走行と高速走行で異なった結果が生じたものの、制振効果の差は小さいといって良いであろう。

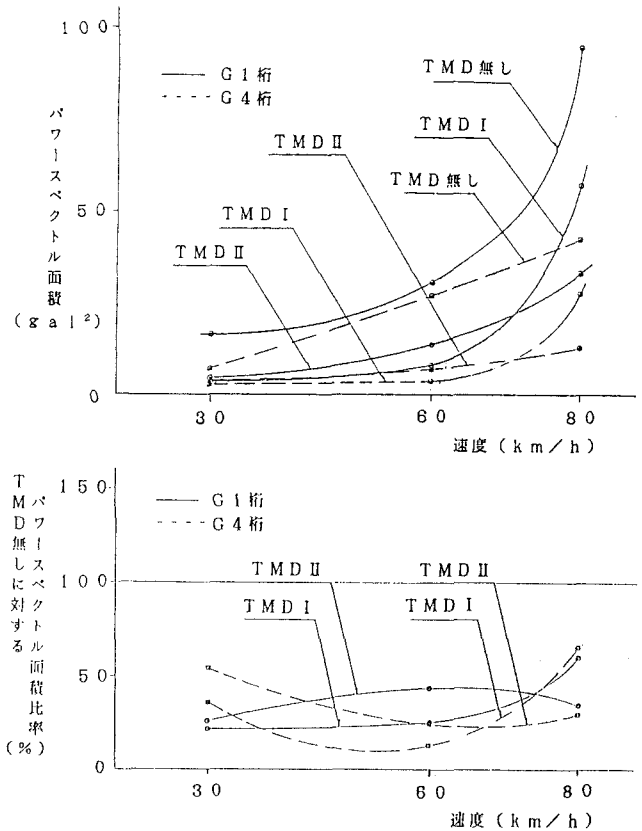


図-11 パワースペクトル面積 (Gal^2) の比較 (10tf車)

6. 結論

単純鈹桁橋 ($l=30\text{m}$) に3個のTMD (3個合計の振動質量比 $R=1/20$) を設置し、試験車走行によりTMDの効果について検討した。その結果、TMDを設置することにより卓越振動数付近の振動はかなり軽減され、パワースペクトルの面積 (Gal^2) で比較すると設置前の約1/2以下となったものの、最大応答値は必ずしも小さくなるとは限らないようである。これは走行車両による振動は車両の固有振動成分による強制振動であること、非定常性の強い振動であること、そして伸縮継ぎ手部付近の段差による衝撃的外力による応答が含まれていることによるものである。従って、TMDの適用には十分注意が必要である。また、TMDの固有振動数を変化させても効果の程度はあまり変わらなかった。

なお、この研究は建設省土木研究所と阪神高速道路公団が1990年に共同研究として行ったものである。関係の方々のご協力に対し心から感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 梶川・大島；周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法，土木学会論文報告集，第308号，1981年 4月
- 2) 讃岐・梶川他；動吸振器の制振効果に関する現地実験，土木学会振動制御小委員会制振コロキウムPARRTB講演論文集(12)，1991年 7月
- 3) 竹下・岡林；走行車両による道路橋振動のための動吸振器の最適設計，土木学会第46回年次学術講演会(I-456)，1991年 9月
- 4) 宮田・宮永・斉藤；中小支間橋梁の自動車走行に伴う振動への動吸振器の適応性、土木学会関東支部講演会，1986年3月
- 5) 阪神高速道路公団・(財)道路環境研究所；道路交通振動対策に関する研究業務報告書，1987年 3月
(1991年9月30日受付)