

動吸振器による高架橋の振動軽減対策

CONTROL OF TRAFFIC VIBRATION ON URBAN VIADUCT WITH TUNED MASS DAMPERS

梶川 康男*・沖野 真**・宇藤 滋***・松浦 康夫****・伊関 治郎*****

By Yasuo KAJIKAWA, Makoto OKINO, Shigeru UTO, Yasuo MATSUURA

and Jiro ISEKI

In order to reduce traffic vibration of the urban viaducts and nearby ground caused by running cars, a passive control method is investigated using tuned mass dampers. First, the vibration characteristics by experimental tests to the viaduct were obtained, and on the basis of the results, the scale of needed mass dampers to reduce the viaduct vibrations was decided using computer simulation methods. Second, Mass dampers were made and tuned using steel plates, springs and silicon oil. Lastly, applying tuned mass dampers on an actual viaduct on the Hanshin Expressway, it was attained that the amplitude of responses of bridge and pier caused by running test cars was definitely reduced, but the reduction of nearby ground was slightly.

1. まえがき

高架橋の振動が原因で周辺地盤および家屋が振動する問題に対し、多くの関係機関において、従来さまざまな軽減対策がとられてきた。それらは、図-1に示したように、自動車のばね上振動や上部構造のたわみ振動に起因する低次振動を対象にしたものと、自動車のばね下振動や伸縮継手付近での段差によって生ずる衝撃に起因する高次振動を対象にしたものとに大別される¹⁾。この中には、実際に施工されたものもあるが、アイデアや模型実験に止まっているものもある。阪神高速道路公団では、この種の交通振動問題に対してさまざまな取組みを行っており、今回、従来から種々提案されている振動軽減対策について調査した結果、周辺家屋にまで伝播し、家屋を振動させていることが多い低次振動を軽減できるものとして、動吸振器 (Tuned Mass Damper、以後TMDと略称する) を用いる対策には実現性があるものと判断するに至った¹⁾。

TMDとは、主振動系に適当な値を持つ弾性ばねと粘性減衰機構を備えた付加質量を取りつけ、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、理論的な研究²⁾は多いが、実際の橋梁に取りつけられた使用実績はさほど多くないが、歩道橋に共振防止対策としての適用例^{3)・4)}があるほか、最近耐風制振対策としての適用例^{5)・6)・7)}が出てきている。

*	工博	金沢大学教授 工学部土木建設工学科	(〒920 金沢市小立野2丁目40-20)
**	工修	阪神高速道路公団 計画部環境対策室	(〒541 大阪市東区北久太郎町4丁目68)
***		阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課	(〒541 大阪市東区北久太郎町4丁目68)
****		阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課	(〒541 大阪市東区北久太郎町4丁目68)
*****		オイレス工業㈱ 技術第2部	(〒252 藤沢市桐原町8)

低次振動に対する対策

対 策 法	件 数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ノージョイント化	1	1	1	1	1	1	1	1	1
橋脚の剛性増加	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TMDの設置	1	1	1	1	1	1	1	1	1
主桁・横桁の補強	1	1	1	1	1	1	1	1	1
主桁連結	1	1	1	1	1	1	1	1	1
アクティブコントロール	1	1	1	1	1	1	1	1	1
主桁の斜張構造化	1	1	1	1	1	1	1	1	1
橋脚剛性の調整	1	1	1	1	1	1	1	1	1
粘性ダンパの採用	1	1	1	1	1	1	1	1	1
制振材の打設	1	1	1	1	1	1	1	1	1

高次振動に対する対策

対 策 法	件 数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ノージョイント化	1	1	1	1	1	1	1	1	1
床版の剛性増加	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端対傾補強	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端部横桁追加	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端横桁補強	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端対傾構RC巻き立て	1	1	1	1	1	1	1	1	1
床版支持	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ジョイント部段差補修	1	1	1	1	1	1	1	1	1
支承の改良	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ゴムジョイントの採用	1	1	1	1	1	1	1	1	1
中間対傾補強	1	1	1	1	1	1	1	1	1

図-1 振動対策法とその件数

そこで、TMDの考え方を本格的に都市内高架橋の上部構造に適用し、高架橋の振動軽減を図るにあたり、必要なTMDの規模と対策の効果について解析し、その結果に基づいてTMDを設計製作し、室内性能試験を経て、阪神高速道路の実橋に取り付け振動実験によって、その有効性および実用性を確認した。

2. 対象高架橋の事前調査

今回、試験的にTMDを取りつける橋梁として阪神高速道路の梅田ランプ橋（この付近の再開発のため、数年後に撤去される予定の橋梁）を選んだ。図-2に橋梁一般図を示した。TMDの設計・製作に必要な諸元を求めるために、事前調査としての大型ダンプトラック（20tf車）による走行試験を実施した。その結果は、つぎの通りである。

1) 固有振動数と振動モード 上部構造の曲げ1次振動として、図-3に示すように、車両通過時の強制振動部分および車両通過後の自由振動部分ともに2.8Hz が最も卓越し、この振動数以外に 2.3Hzと 3.8Hzにスペクトルのピークが認められるが振動モードは明らかではない。橋脚の橋軸方向成分として上部構造の卓越振動数とともに4.4Hz の振動数が表れている。

2) 減衰定数 車両通過後の自由振動部分の波形から求めた減衰定数は、0.019 ～0.039 であり、スペクトルのハーフ・パワー法から求めた減衰定数は、0.029 である。

3) 変位振幅 大型ダンプトラック（20tf車）の走行（料金所が近く、登坂・入路のため、走行速度はほぼ30km/h）によって生じる静たわみは約 3mmであり、動的全振幅は0.75 ～1.1mmであった。

4) 地盤振動 同一車両の10回の走行によって生じた

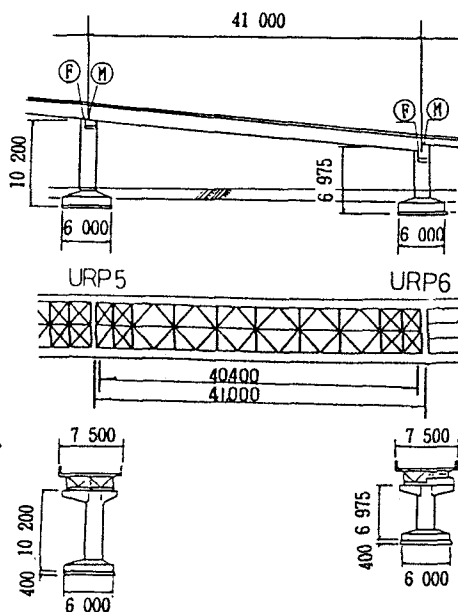


図-2 梅田ランプ橋の一般図

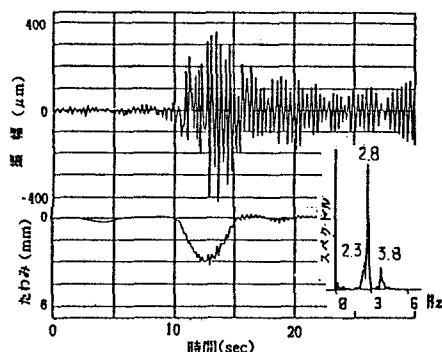


図-3 事前調査の結果

地盤上（橋脚直下付近）での振動加速度レベル（ピーク値の平均）は、上下方向で50dB、橋軸直角方向39dBである。なお、地盤での卓越振動数は上部構造と類似したものに比べて、橋脚に関係すると思われる4～5Hzの振動数のものも含まれている。

3. 動吸振器の基本設計

事前調査の結果より、TMDをけたの支間中央付近に設置し、曲げ1次振動（2.8Hz）の軽減を図ることとした。まず、動吸振器の詳細設計や製作に入る前に、動吸振器の概略を設計し、軽減効果を解析的にシミュレーションすることとした。

図-4にTMDの概念図と解析モデルを示した。動吸振器の基本設計については、高橋・倉西の研究²⁾を参考にして、最適なTMDの大きさとその諸元を決定した。一般に、TMDの効果は、主振動系のみかけの減衰定数によって表され、主振動系との質量比（ $R=M/M_0$ ）と固有振動数比（ $\beta=f/f_0$ ）TMDの減衰定数（ h_D ）をパラメータにして示される。その一例を図-5に示した。図-5より、TMDの重量が大きいほどけたの減衰が大きく、TMDの減衰定数の変化（温度や材料特性によって生ずる）に対してその変動が小さく実用に適していることが理解できる。本橋においては、けたの構造寸法上の制約から $R=1/20$ を上限と判断し、重量8t（1t，8基）のTMDを使用することとした。また、固有振動数比 β については0.95付近が最適と考えられ、これを採用して $f=2.64\text{Hz}$ とした。図-6には $R=1/20$ 、 $\beta=0.95$ の場合の周波数応答曲線を示した。そして、TMDの減衰定数 h_D は図-6より、 $\eta=0.9\sim 1.1$ の範囲で応答倍率が安定していることと、最適減衰0.22の場合と大きな差がないことから0.16を採用した。これにより、けたに付加される減衰定数は使用する減衰器用粘性材料の温度特性により7(30℃)～12%(0℃)が期待されることとなる。

4. 軽減効果の予測シミュレーション

既設の橋梁に対して交通振動の軽減対策を施工するにあたっては、事前にその効果の有無を予測することが必要である。この予測手法については、より実際の構造に近いシミュレーションが行われるようになりつつある^{8)・9)}。その手法を用いて、今回、対象とする高架橋に基本設計されたTMDを取りつけたときの振動軽減の効果を予測した。

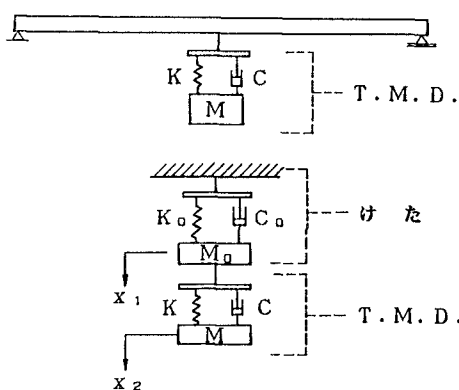


図-4 TMDの概念と解析モデル

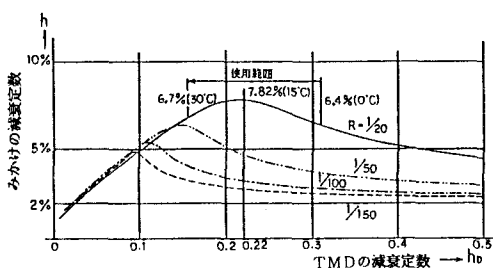


図-5 TMDの重量・減衰定数とみかけの減衰定数

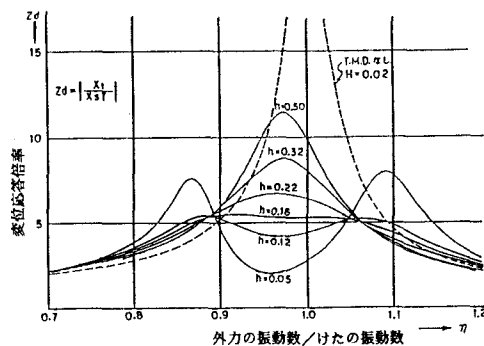


図-6 TMDの周波数応答
($R=1/20$, $\beta=0.95$)

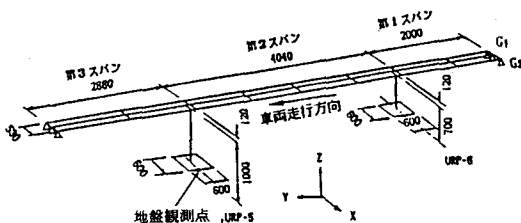


図-7 シミュレーションモデル

(1) 解析方法

対象とするスパンの前後のスパンおよび橋脚・地盤をも含めて、モデル化したものを図-7に示した。なお、曲げ1次振動数が実測値と合うように主桁の曲げ剛性を調整した。このモデルに対して、固有剛性マトリックス法¹⁰⁾を拡張した方法により固有振動モードを求めた結果を図-8に示した。実態に合わせて橋脚上での支承のすべりを考慮していないため、3径間連続桁の振動モードに類似したものとなっている。このようなモードを持つモデル上を走行荷重が通過するときの動的応答解析法および地盤振動解析法については文献^{8), 9)}によった。ただし、これらの解析を行う際の主振動系の減衰定数については、事前調査の実測値を参考に下部構造も含めて3%とした。路面凹凸については、阪神高速道路守口線で光学式プロファイルメータにより実測したデータ¹¹⁾をもとに、縦断勾配に相当する長周期成分を除去し、主桁の実測振動振幅と応答値が合うように路面高を補正したものをを用いた。そして、自動車モデルとしては、図-9のように4自由度にモデル化したものをを用いた。TMDについては、曲げ1次振動(2.8Hz)を対象に基本設計されたもの(重錘1tf/基、2.64Hz、減衰定数16%)を対象の第2径間中央に8基、第1径間中央に4基、第3径間中央に6基を取りつけるものとした。

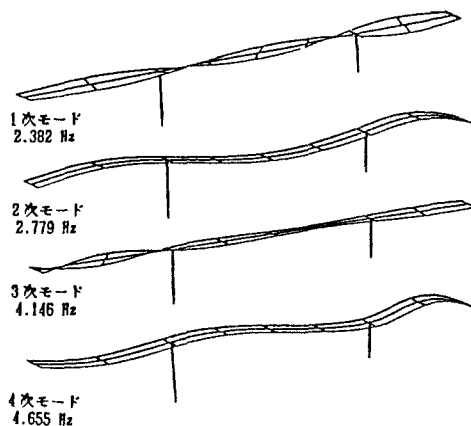


図-8 振動数と振動モード

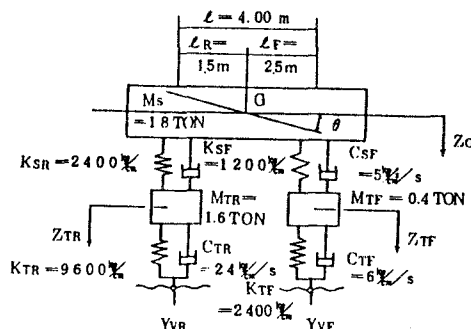


図-9 4自由度自動車モデル

(2) 解析結果とTMDの効果に対する考察

解析として、自動車が5, 10, 15 m/s (18, 36, 54 km/h) の速度で外桁(G_3)と中桁(G_2)上を走行したときの基本構造とTMDを取りつけた構造の応答をシミュレーションした。その解析結果を図-10に示した。

1) 上部構造 第2径間中桁支間中央点での結果を図-10(a)に示した。基本構造では走行桁や走行速度にあまり関係なく最大変位振幅で0.4~0.5 mm、最大加速度振幅で14~19 cm/s²、実効値で9~11 cm/s²となっている。TMDを取りつけると、最大変位振幅で0.2~0.3 mm、最大加速度振幅で6~10 cm/s²、実効値で4~6 cm/s²と、ほぼ半分の振幅となっている。TMDの挙動については上部構造の動的振幅が不規則であるために、正弦波入力に比べて大きな振幅とはならず、取付け位置の約2倍の振幅とな

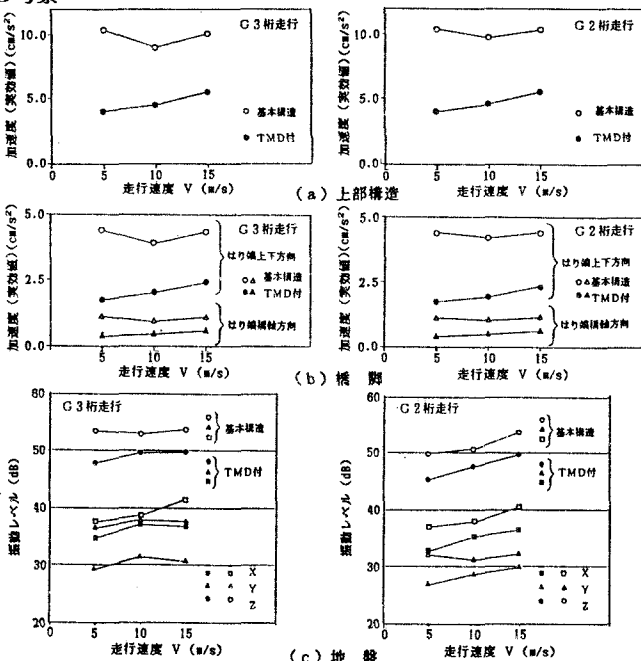


図-10 TMDによる振動軽減効果のシミュレーション結果

っている。

2) 橋脚 橋脚(URP-5)における、はり端上下方向と橋軸方向についての結果を図-10(b)に示す。ともに上部構造の挙動と同様の傾向にある。基本構造のはり端上下については最大変位振幅で約0.2mm、最大加速度振幅で $6\sim 8\text{cm/s}^2$ 、実効値で約 4cm/s^2 となっている。そして、TMDを取りつけた構造では、最大変位振幅で0.1mm、最大加速度振幅で $3\sim 4\text{cm/s}^2$ 、実効値で約 2cm/s^2 となっている。はり端の橋軸方向については、最大変位振幅で約0.05mm、最大加速度振幅で約 1.5cm/s^2 、実効値で約 1cm/s^2 であるが、TMDによって最大変位振幅で約0.03mm、最大加速度振幅で約 $0.7\sim 1\text{cm/s}^2$ 、実効値で約 0.5cm/s^2 となり、はり端上下方向と同様、約半分の振幅となっている。橋軸直角方向については、はり部の張出し量が短いため応答は小さくなっている。

3) 地盤 橋脚(URP-5)脇の地点の振動レベル値を求め、図-10(c)に示す。上下方向については50～54dBの振動がTMDの取付けによって45～50dBとなっており、3～5dBの低減となっている。橋軸方向・橋軸直角方向については40dB以下の低いレベルの振動になっているが、応答計算ではさらに2～6dBほど小さくなっている。

以上のように、TMDの取付けによって上部構造や橋脚では約半分の振幅となり、地盤では3～5dBの低減となった。これらのシミュレーション結果がそのまま実際の構造で現れるものではないであろうが、かなりの効果が期待できる結果となっていることから、試験的にTMDを製作し、実際の高架橋に取りつけてその効果を確認することとした。

5. 動吸振器の製作と性能の検定

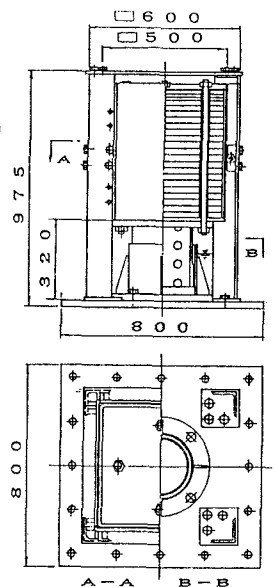
基本設計されたTMD(重錘1t/基、2.64Hz、減衰定数16%)を実際に製作するためには、重錘、ばね、減衰装置などについて詳細に検討しなければならない。

(1) 実験用TMDの試作

1) 重錘 TMDの固有振動数の微調整の便宜上、正方形(480x480mm)の鋼板(板厚6～25mm、材質SS41)を積み重ねて、通しボルトで締めつける方法とし、鋼板の増減によって重量を調整することとした。結局、25mm鋼板19枚、19mm—1枚、9mm—2枚、6mm—2枚の重錘とした。

2) ばね 圧縮コイルスプリング(材質SUP-6)1個を使用することとした。線径26mmを用いて、コイル中心径154mmとし、有効巻数を4.5、自由長300mmとすることで、ばね定数278kgf/cmを目標とした。ばね定数は、通常 $\pm 10\%$ 程度の誤差を伴うので、振動数については鋼板の増減によって微調整することとした。なお、ばねに生ずるせん断応力は疲労破損や疲労変形に対して十分安全であることも確認した。

3) 減衰器 シリコン系粘性材料(オイレスSA-S)を使用した円筒型粘性せん断型減衰装置(鋼管によるケーシングと可動シェルとの隙間2mmにある材料の粘性を期待する形式)を用いることとした。減衰定数の目標値は16%であるので、この値を15℃において得られるように設定したので、0℃では23%、30℃では11%程度の減衰定数となる。



以上に示した諸元を持つTMDを実験的に製作した。その概要を図-11に示した。なお、TMDの重錘が首振りすると摩擦が生じ、減衰機構に悪影響を及ぼすので、重錘の側面をローラーでガイドした。

図-11 実験用TMDの構造図

(2) 実験用TMDの検定実験

実験的に製作したTMDに対して、自由振動実験と強制振動実験を実施し、その性能を調査した。

1) 自由振動実験 TMDの重錐部に初期変位 (0.5mm ~ 30mm) を与えて解放し、重錐部の変位振幅を測定して固有振動数と減衰定数を確認した。ばね定数は267kgf/cmであったので、重錐の重量を微調整して固有振動数を2.64Hzとなるようにした。減衰定数の測定結果を表-1に示した。この実験結果から、非減衰自由振動 (粘性体がない場合) では、初期変位が増加すると減衰定数が減少しており、装置の摩擦力の影響と考えられる。また、減衰自由振動 (粘性体がある場合) においても、初期変位が大きくなると減衰定数が低下しており、ダンパーの非線形特性が現れている。TMDの実橋での変位全振幅の予想値 (実測値・解析値ともに約1mm程度) 付近では、目標値16%に対して18~20%が得られた。

2) 強制振動実験 TMD (総重量1.3t) を実験用治具にのせ、その治具を油圧サーボ型上下加振装置 (金沢大学所有UHF-40) で振動させた。入力波は正弦波とし、1Hzから10Hzまでの定常加振とした。その結果、得られたTMDの共振曲線を図-12に示した。これによると、加振振幅が0.5mmのときの減衰定数は、目標値16%に対して18~21%が得られている。しかし、加振振幅が小さくなるにつれて共振振動数が大きくなる傾向にあり、しかも、減衰自由振動実験と同様に、加振振幅が大きくなると減衰定数が低下しており、ダンパーの非線形特性が現れている。このほかに、強制振動実験として、事前調査で得られた試験車走行時の実測変位波形を入力し、TMDの応答を求めるとともに、この波形を連続的に繰り返し入力し、長期にわたる場合の性能の変化を観察したが、特に異常は認められなかった。

以上の自由振動実験と強制振動実験との結果より、減衰定数が振幅依存性を持っており、極力摩擦力を低減し、さらに実橋で見られるような低振幅入力に対しても確実な作動を期待できるように、重錐の首振り防止用に設けたガイドローラーなどの改良が必要であるとの結論に達した。

(3) 実橋用TMDの製作

実橋に設置するTMDとしては、摩擦の原因と考えられたガイドローラーを撤去し、U字形の薄板ばね (1mm厚、半径50mm) によるガイド装置を用いることにより、摩擦力の低減を図ることとした。また、製作上の都合から図-13のように重錐と箱を円形にした。

1) 重錐 円形 (φ570mm) の鋼板 (50mm - 7枚、25mm - 2枚、9mm - 1枚、材質SS41) を実験用と同様、積み重ねて、通しボルトで締めつける方法とした。

2) 半円形薄板ばね バネ用ステンレス鋼 (1mm厚、幅87mm、材質SUS304 CSP) を半径50mmの半円形に曲げ、図-14のように、2枚を一組として用いることで、P方向のばね定数として17kgf/cm (四方向上下の計8セットで136kgf/cm) が得られる。なお、W方向には一組あたりのばね定数が90kgf/cmとなり、さらに、直角位置にある薄板ばねの面外方向の剛性が加わるので、重錐は横方向に十分な剛性で支えられていることとなる。上下方向の

表-1 初期変位と減衰定数の関係

非減衰自由振動実験		減衰自由振動実験	
初期変位 (mm)	減衰定数 (%)	初期変位 (mm)	減衰定数 (%)
0.5	9.4	0.5	34.5
1.5	4.2	1.0	19.8
2.5	2.1	2.0	17.7
3.5	1.8	3.0	12.3
5.0	1.4	5.0	12.2
8.0	0.6	7.0	11.8
15.0	0.5	10.0	11.1
20.0	0.5	15.0	10.1
		20.0	8.3
		30.0	6.7

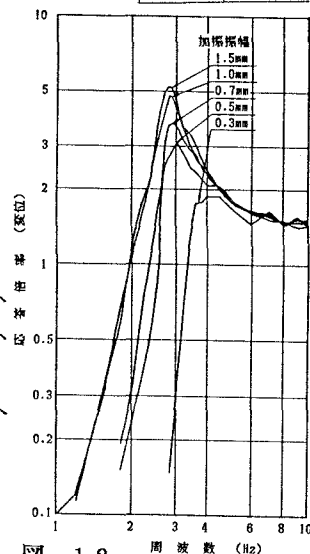


図-12 実験用TMDの共振曲線

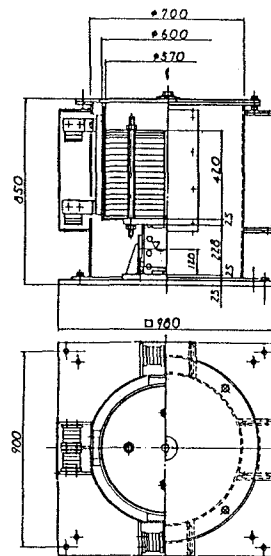


図-13 改良した実験用TMDの構造図

ばね定数については、結局、薄板ばねの値とつぎに示すコイルばねの値を加えた値となる。

3) コイルばね ガイド装置として薄板ばねを用いるので、実験用のばねよりも軟らかい圧縮コイルスプリング（材質SUP-6）1個を使用することとした。線径22mmを用いて、コイル中心径 163mmとし、有効巻数を 3.75、自由長 300mmとすることで、ばね定数145kgf/cm を目標とし、薄板ばねとの値とて281kgf/cm となるようにした。

4) 減衰器 実験用と同じシリコン系粘性材料（オイレスSA-S）を使用した円筒型粘性せん断型減衰装置を用いることとした。

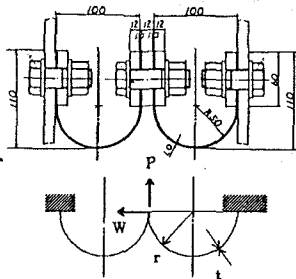


図-14 U字形薄板ばねの構造

(4) 実橋用TMDの検定実験

装置組立後、まず、初期変位による自由振動実験によって非減衰時の振動数を求め、重錐の重量微調整によって2.63~2.65Hzの範囲に固有振動数を設定した。その後、粘性材料を注入し減衰定数を求めた。製作した8個のTMDの固有振動数と減衰定数（15℃での値）を表-2に示した。一方、摩擦力については、ほぼ所期の目的を果たすことができ、図-15のように非常に小さな初期変位に対しても、十分の波数が得られ、改良の効果が現れた。また、1.5mmの振幅で実施した100万回の繰り返し加振後においても、全く振動特性に変化は見られなかった。さらに、実橋での施工誤差を考えて、5/100の傾斜実験を行ったが、やはり振動特性に変化はなかった。

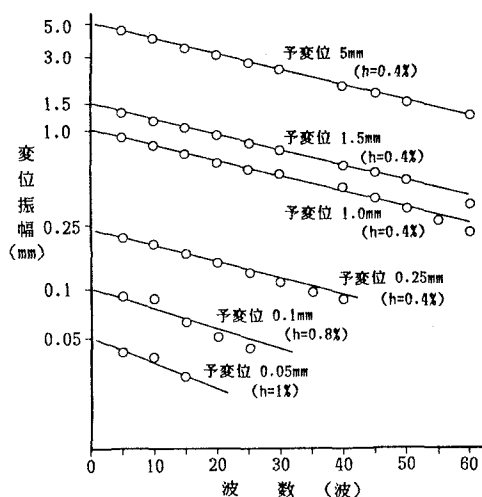


図-15 実橋用TMDの予変位と減衰

以上のように、実用上十分な性能をもつTMDを製作することができた。

表-2 各TMDの固有振動数と減衰定数の測定値

装置番号	1	2	3	4	5	6	7	8
固有振動数(Hz)	2.64	2.66	2.65	2.64	2.64	2.65	2.63	2.64
減衰定数(%)	17.3	14.2	16.0	14.8	15.9	14.2	16.0	16.5

6. 動吸振器の設置と施工

TMDは橋梁の美観を考え、図-16のように主桁間に設置することとした。ところが、本橋の場合、支間中央付近に分配横桁はないが対傾構と横構があり、8個のTMDを設置する上で支障をきたすために、支間中央付近の横構の一部を撤去し、その補強のため図-16に示した位置に対傾構を新設した。TMDを載せる架台は幅100cm、高さ25cmの箱断面とした。この4個の架台の上に、それぞれ2台のTMD（全体で計8個）をボルトで固定した。

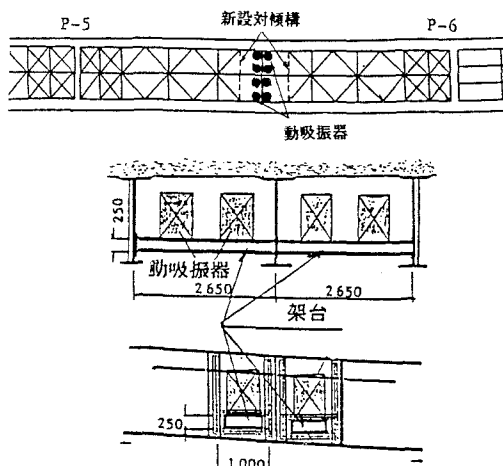


図-16 実橋へのTMDの設置図

7. 振動軽減効果の確認

TMDを設置することによって振動軽減の効果がどの程度あるかについて、TMD設置後に衝撃加振実験

と大型ダンプトラックによる走行試験を実施した。

(1) 衝撃加振実験

衝撃加振実験には、組立式の小型衝撃加振装置を使用し、一般の自動車が走行していない間に実施した。衝撃加振点は、 G_2 桁と G_3 桁上の 1/2点と 1/4点の路面であり、各点10回ずつ加振した。この装置では、70kg程度の重錘を約80cmの高さから落下させ、重錘が路面に置いた荷重計と、クッションゴム (約 5cm厚) を介して衝突することによって生ずる 1 回の衝撃 (約 5tf) で加振し、その応答から橋梁の振動特性を求めるものである¹²⁾。衝撃加振実験は、TMDの重錘をボルトで固定したときと作動状態にしたときで行い、両者を比較した。

図-17に、衝撃加振時のTMDの重錘が固定状態のときと作動状態のときの、伝達関数のボード線図を示した。また、図-18には、モード解析法より得られる代表的な振動モード (曲げ1次振動、ねじり1次振動) を示した。この結果によると、曲げ1次振動の軽減をねらったTMDが作動状態にあり、ダンパーとして有効に働いているときには曲げ1次振動のピークは低くなり、2つに分かれている。振動モードもはっきりしないものとなっている。一方、ねじり1次振動についてはピークならびにモードともにあまり変化していないことがわかる。ところが、事前調査の結果と比較すると曲げ1次振動数が2.8Hz から2.6Hz に変化しており、しかも、事前調査でははっきりしなかった振動(3.8Hz)がねじり振動(4.2Hz)としてはっきりと現れてきた。これらは、TMDと架台の重量増加や架台によるねじり剛性の増加の影響であろう。

以上のように、衝撃加振実験の結果によれば、TMDの効果が曲げ1次振動に対しては現れていることがわかった。

(2) 走行試験と軽減効果—その1

車両走行時におけるTMDの効果を確認するために、走行車線を規制し、試験車として大型ダンプトラック (20tf車) を用いた走行試験を行った。走行試験は、8基すべてのTMDの重錘をボルトで固定したとき、半分の4基のTMDの重錘を固定し、残りの4基のTMDを作動状態にしたとき、8基すべてのTMDを作動状態にしたときで行い、三者を比較した。図-19に車両走行側の外主桁 (G_3 桁) 支間中央点の振動加速度波形とそのスペクトルを示した。振動波形ではは

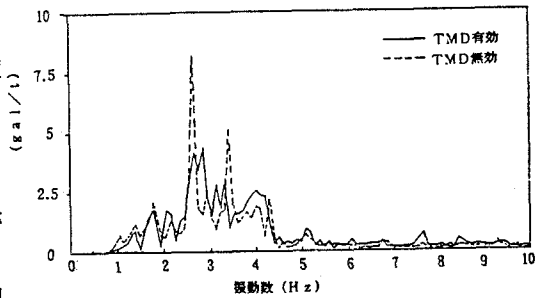


図-17 衝撃加振による周波数応答スペクトル

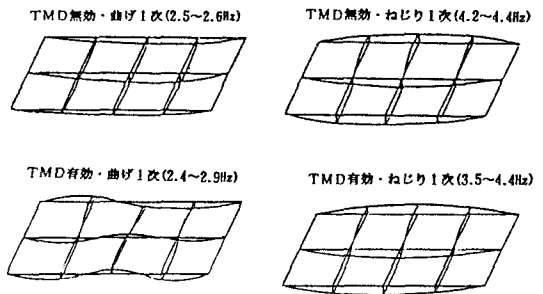


図-18 衝撃加振による振動モード

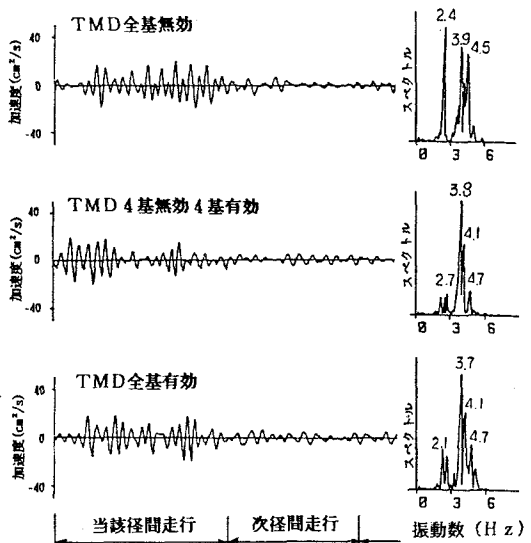


図-19 車両走行時の加速度波形と
スペクトル (その1)

っきりとその差が現れていないがスペクトルを見ると、TMD固定状態では曲げ振動（2.4Hz、強制振動時のため車両重量の影響で少し低くなっている。）のピークが卓越しているが、TMD作動状態ではそのピーク高が下がり、ねじり振動（3.6-3.9Hz、曲げ振動と同じ理由でやや低め）が卓越している。他の主桁においても同様の結果となっている。このことから、曲げ振動に対してTMDが有効に働いていると判断でき、しかも、半分の4基でも十分な効果が得られていることがわかる。

ところが、これらの結果によるとねじり振動が目立ってきており、振動軽減の面から考えると少し問題である。このねじり振動については、事前調査段階では特に目立った動きをしておらず、あまり注意していなかった。不注意であったと言わざるを得ないが、おそらく架台の増設によるねじり剛性の変化が原因であろう。このねじり振動に対しても対策を講ずることになった。

（3）ねじり振動対策

ねじり振動が卓越するのは、外桁であるのが一般的である。本橋の場合、中桁にもねじりの振動数が現れており、振動モードとしては少し変則であるが、外桁に取りつけた4個のTMDをねじりの振動数に調節し直し、中桁の4基のTMDには曲げ振動に対して作動させ、外桁の4基のTMDにはねじり振動に対して作動させることによって、両振動を同時に軽減させることにした。幸いにも、前述の走行試験によって4基のTMDだけで曲げ振動が十分軽減できることが判明しており、しかも、半円形薄板ばねのばね定数は板厚の3乗に比例することから、8組設置されている薄板ばねのうち上段2組のばねを現状の1.0mm厚で87mm幅・半径50mmから、1.5mm厚で97.4mm幅・半径37.5mmに寸法を変更することによって、TMDのばね定数を281kgf/cmから552kgf/cmに上げることができ、現状の2.64Hzをねじり振動用の3.7Hzに変えることが可能である。このことから、外桁に取りつけられている4基のTMDについて現場において薄板ばねの一部を新しいものに取り替えた。その結果、これらのTMDの振動数をほぼねじり振動数（3.7Hz）に近い値に調節することができた。これにより、曲げ振動に対するTMDの有効質量比は1/40となり、ねじり振動に対しては1/27となった。

（4）走行試験と軽減効果—その2

中桁の4基のTMDを曲げ振動に対して作動させ、外桁の4基のTMDをねじり

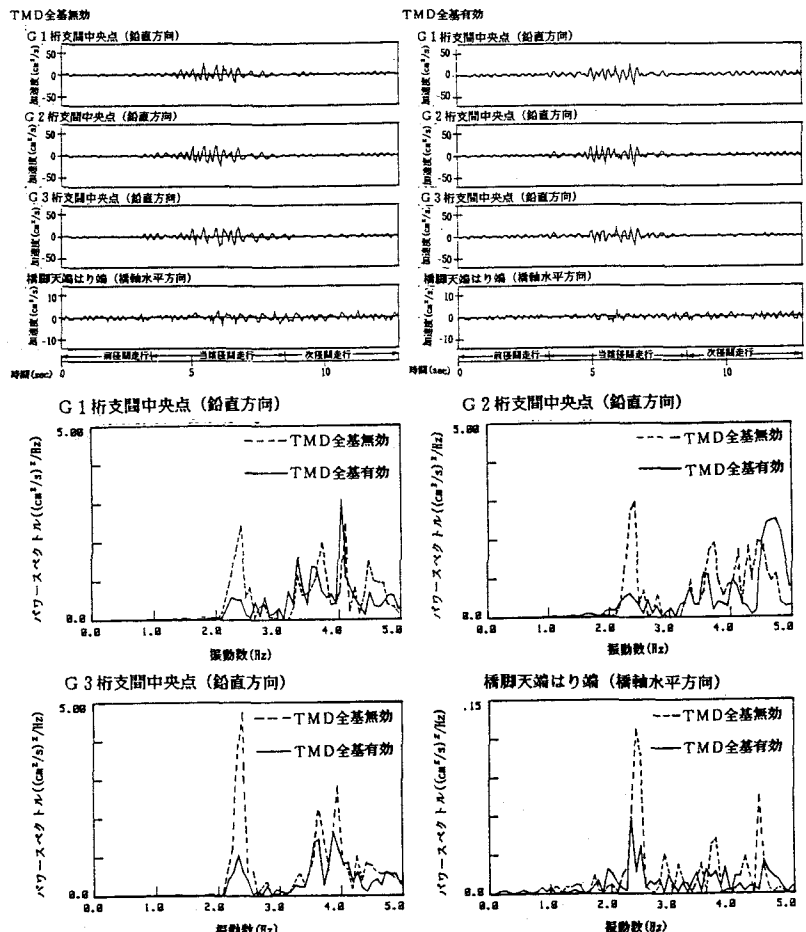


図-20 車両走行時の加速度波形とスペクトル（その2）

り振動に対して作動させることによって、得られる振動軽減効果がどの程度であるかを確認するために、大型ダンプトラック（20t車、約28km/h）による人工路面（振動振幅を大きくするために、路面に4mm厚のゴム板を2m間隔に配置）走行試験と通常の路面上走行試験を行った。今回は、8基すべてのTMDを固定した状態とすべてが作動する状態（通常の供用状態）で走行試験を実施し、両者を比較した。

図-20に人工路面上走行試験時の各主桁支間中央点上下方向ならびに橋脚天端はり端橋軸水平方向の振動加速度波形とそのスペクトルを示した。加速度波形には、さまざまな振動数が含まれているため、その波形からTMDの効果である振幅の減少をはっきりと読み取ることは難しいが、曲げ振動数付近（2.4～2.8Hz）とねじり振動数付近（3.6～4.0Hz）でのスペクトルの高さをみると、かなり大きく減少しておりTMDの効果が明確に現れている。他の走行状態（人工路面ではなく、通常の路面での走行車線走行や追越車線走行など）では、振幅がやや小さいのでスペクトルの高さの減少の程度が小さいが、同様の傾向にある。ところが、ねじり振動数付近での減少の程度が曲げ振動数付近に比べて小さく、現場での振動数の調整（Tuning）の難しさを示唆している。一方、地盤振動については、上部構造や橋脚からの振動レベルに比べて暗振動のレベルが高く、高架橋からの振動を抽出することが難しく、振動軽減の程度は明確には現れていないが、上部構造の振動がさらに大きくなれば、その振動数成分が卓越することから、上部構造での軽減効果が地盤にも現れることが期待できよう。これについては、今後、大きな振幅が得られるような繰返し式の起振機実験や他の走行試験を実施し、確認することが必要である。

8. まとめと今後の課題

今回、TMDを振動軽減対策として都市内高架橋の上部構造に適用するにあたり、必要なTMDの規模と対策の効果について解析し、その結果に基づいてTMDを試作し、室内性能試験を経て改良し、阪神高速道路の実橋に取りつけ各種の振動実験によって、その有効性および実用性を確認することができた。それらをまとめると、つぎの通りである

（1）既設の橋梁に対して交通振動の軽減対策を施工するにあたっては、事前にその効果の有無を予測することが必要である。事前調査とその結果に基づいたシミュレーション手法を用いて、TMDを取りつけたときの振動軽減の効果を予測した。

（2）鋼板を積み重ねて重錐とし、圧縮コイルスプリングとシリコン系粘性材料を使用した円筒型粘性せん断型減衰装置によって所定のTMDを製作することができた。ところが、重錐の首振り防止用に用いたガイドローラーの摩擦が原因で、加振振幅が小さくなるにつれて共振振動数が上がり、減衰が大きくなるという振幅依存性が生ずることとなり、改良が必要となった。摩擦の原因と考えられるガイドローラーを撤去し、U字形の薄板ばねによるガイド装置を開発し、それを用いることにより、摩擦力の低減を図ることができた。この結果、TMDは非常に小さい振幅に対しても十分作動することが確認できた。

（3）TMDを実橋に設置し、その振動軽減効果を確認するために、衝撃加振実験と大型ダンプトラックによる走行試験を実施した。その結果、所期のねらいである曲げ振動については軽減させることができた。

（4）TMDを設置するために用いた架台の剛性が橋梁のねじり剛性に影響し、事前調査では卓越していなかったねじり振動が目立つ結果となったため、外桁に取りつけたTMDのU字形薄板ばねを取り替えることによって、ねじりの振動数に合わせて再調節し、大型ダンプトラックによる走行試験を実施して、その軽減効果を確認した。

以上が確認できた点であるが、反省を含めて、今後の課題としてつぎの点を指摘することができる。

（a）TMDの取り付け架台の重量や剛性を正しく評価し、橋梁系の振動特性（振動数、振動モードなど）の変化を事前に把握しておく必要がある。また、実橋に取りつけた後にもTMDの振動数を微調整できる構造としておくことが望まれる。

(b) 高架橋の場合、主桁と言えども、車両の走行位置や走行状態によって複雑な挙動をしており、TMDもその挙動に支配され、首振りならびに回転などの動きの可能性が認められており、より効果あるTMDを開発するためにはこれらの挙動についても正確に把握する必要がある。

(c) TMDが、所定の性能を長期間にわたって維持しているかについて、今後も追跡調査をする必要がある。

最後に、阪神高速道路公団では、高架橋の交通振動問題に対しても積極的にさまざまな取り組みを行っており、今回も新しい取り組みとして動吸振器を採用した。今後も、いろいろと検討して、よりよい道路環境と橋梁環境を整備していくつもりである。また、本報告は阪神高速道路公団道路交通振動対策研究委員会の研究成果^{1)・13)}の一部をとりまとめたものであり、委員各位および協力をいただいた関係各位に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・働道路環境研究所：道路交通振動対策に関する研究業務報告書、1987。
- 2) 高橋・倉西：動吸振器による可撓性構造物の振動抑制について、
土木学会論文報告集、第 308号、pp.15-24、1981。
- 3) 松本・佐藤・西岡・塩尻：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究、
土木学会論文報告集、第 205号、pp.63-70、1972。
- 4) 松崎・西岡・松本：歩道橋に取り付けた吸振器の効果について、
土木学会論文報告集、第 261号、pp.129-131、1977。
- 5) 辻：構造力学的耐風制振対策、日本風工学誌、第20号、pp.81-102、1984。
- 6) 嶋田・大久保・藤澤・五十畑・柄：複合斜張橋（秩父橋）の上部工の施工、
橋梁と基礎、19巻12号、pp.1-9、1985。
- 7) 津村・金沢・加納：樫石島橋主塔の耐風制振装置、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、
I-315、1986。
- 8) 梶川・大嶋：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 341号、pp.79-86、1984。
- 9) 梶川・沖野・吉川・榎本：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果
土木学会構造工学論文集、Vol.35A、1989。
- 10) Hayashikawa T.and N.Watanabe:Behavior of Continuous Beams with Moving Loads,
Proc. OF ASCE,Vol.107,No.EM1,pp.229-246,1981。
- 11) 川谷・小菅・嶋田・小松：路面不整の統計学的特性と道路橋の衝撃係数、
土木学会構造工学論文集、Vol.33A、pp.459-466、1987。
- 12) 岡林・原：道路橋振動特性測定における衝撃加振法の適用、
土木学会構造工学論文集、Vol.34A、pp.731-738、1988。
- 13) 阪神高速道路公団・働道路環境研究所：道路交通振動対策に関する研究業務報告書、1988。
(1988年10月12日受付)