

# 転動型制振装置の照明柱に対する制振効果

尾畑守夫<sup>1</sup>・森尻 渉<sup>2</sup>・島崎洋治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 日本コムシス株式会社 技術研究開発センタ (〒279-0002千葉県浦安市北栄四丁目8-3)

<sup>2</sup>日本コムシス株式会社 技術研究開発センタ (〒279-0002千葉県浦安市北栄四丁目8-3)

<sup>3</sup>正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292神奈川県平塚市北金目1117)

転動型制振装置は、パッシブ型動吸振器の一種で、円筒状の容器に収容されたシリンダー状のおもりの転動運動により発生する制御力を利用して、構造物の揺れを抑制する。本装置を高速道路高架橋上に設置された照明柱の振動抑制に適用し、その有効性について検証した。制振対象照明柱は、交通振動に起因した橋桁の卓越振動モードとの共振により、面内2次固有振動モードでの揺れが発生していた。転動型制振装置の設置により、共振による揺れが抑制され、照明柱基部でのひずみ測定においても疲労寿命が改善される結果となり、本装置の制振効果が確認された。

**Key Words :** TRMD, dynamic damper, lighting pole, resonance, vibration reduction

## 1. はじめに

近年、高架橋上に設置された照明柱や標識柱等の付帯構造物において、振動が原因と考えられる損傷事例が何件か報告されている<sup>1)</sup>。振動による損傷の発生原因として、従来の設計においては、死荷重や風荷重といった静的な荷重のみが考慮されており、構造物の振動特性や動的な荷重に対する検討がなされていないことが挙げられる。特に、共振による振動が問題となる場合は、大きな繰り返し応力の発生も考えられ、構造物に与える影響は大きい。最近では、新設構造物に対し、疲労設計の考え方を考慮した設計指針も示されている<sup>2)</sup>。しかし、既存の構造物の中には、依然として過酷な振動にさらされているものもあり、構造物本体の損傷のみならず、道路上や橋下への部材落下等による二次災害発生の危険性も含んでおり、予防保全の観点からも対策を検討する必要があると考えられる。

こうした構造物の振動問題の対策手段として、制振装置の適用がある。これは、構造物を1つの質量振動系と考えた場合に、付加質量振動系として制振装置を設置することにより、構造物の減衰性能を向上させるものである。これまでにも、風の影響を受けやすい沿岸部の橋梁上に設置された照明柱において、チェーン式ダンパや鋼球式ダンパによる制振対策の事例がある<sup>3)~5)</sup>。近年では、高架橋上の照明柱や門型標識柱における TMD (Tuned Mass

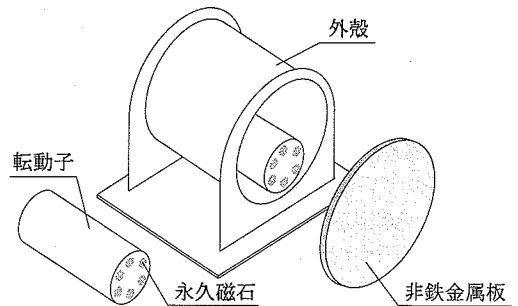


図-1 TRMD 概要図

Damper) の適用事例も報告されている<sup>6)</sup>。我々は、新しいタイプのパッシブ型動吸振器として転動型制振装置：TRMD (Tuned Rotary-Mass Damper) を提案し、これまで研究開発を行ってきた<sup>7)~13)</sup>。

本論文では、TRMD の実機適用事例として、一般供用下の高速道路高架橋上に設置された照明柱を対象とした振動抑制の実橋実験を実施したので、その結果について報告する。

## 2. TRMD

図-1 に、TRMD の概要図を示す。本装置は、円筒状の容器（外殻）と、シリンダー状のおもり（転動子）からなる。転動子は、外殻内で自由な転動運動が可能であり、このときの転動子の固有振動数は、

外殻と転動子の径の差で決まる。これを制振対象構造物の固有振動数に同調させ、装置を適所に設置することにより、構造物に入力された振動エネルギーを転動子の運動エネルギーとして吸収する。さらに、転動子側面に配置した永久磁石と非鉄金属製の外殻蓋よりなる磁気ダンパにより、吸収した振動エネルギーを熱エネルギーとして散逸することで、構造物の振動の低減を図るものである。磁気ダンパに関しては、機械工学等の分野において古くから研究がなされている<sup>14)~19)</sup>。減衰原理は、転動子の転動運動に伴い、非鉄金属板を貫く永久磁石の磁束が変化することにより、非鉄金属板に渦電流が発生し、運動と逆向きに制動力が得られるものであり、その力を装置減衰力として利用している。

このように、TRMDにおいては、従来型のTMDに見られるバネや粘性ダンパ等の機械的機構を一切排除したシンプルな構造となっていることが大きな特徴である。これにより、照明柱のような小規模構造物においては、小型でコストパフォーマンスに優れた装置の実現が可能であると考えられる。また、幾何学的形状で固有振動数が決まること、磁気ダンパに適用しているネオジウム磁石は機械的強度に優れ、磁力劣化も1年で0.1%~0.3%程度であることから、従来型におけるバネ定数や粘性ダンパ特性の経年変化による制振性能への影響が少なく、メンテナンス性にも優れている。装置の設計においては、TMDと同様に、構造物の制振対象固有振動モードに対し、転動子質量、固有振動数、減衰率の調整が必要であるが、この際の構造物—TRMD 連成振動系に関する数値解析的取り扱いについては、参考文献 12) を参照されたい。

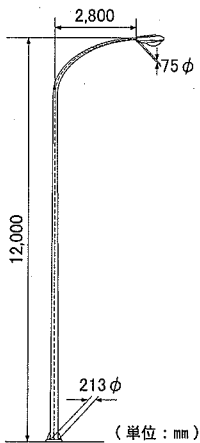


図-2 照明柱概要図

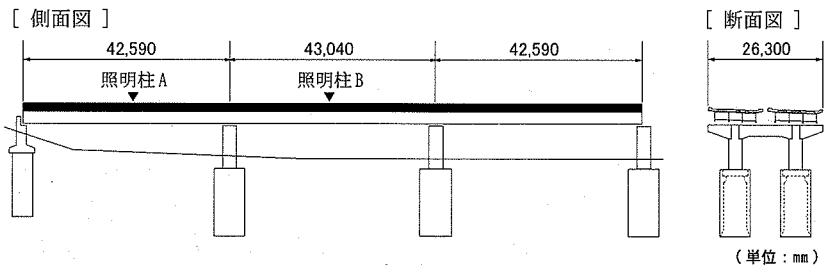


図-3 高架橋概要図

### 3. 照明柱の振動測定概要

#### (1) 制振対象照明柱

実践的な実機適用効果を検証するため、既設照明柱を対象として、管理記録をもとに現地調査を実施した。その中で、交通振動に起因した橋桁の振動により、照明柱に激しい揺れが発生している現場を選択し、この照明柱を制振対象とした。図-2 に、制振対象照明柱の概要図を示す。照明柱は、高さ 12m、アームの出幅 2.8m のテーパーポールで、円形断面の径は基底部で 213mm、先端部で 75mm である。実験では隣接した 2 本の照明柱を制振対象とした。照明柱の設置された高架橋の概要図および照明柱の設置箇所を図-3 に示す。高架橋は、3 径間連続合成 I 桁橋で、照明柱は橋脚の中間点付近の橋桁側壁に固定された設置台にアンカーボルトで固定されている。以下、2 本の制振対象照明柱を図-3 にならい照明柱 A および B と呼ぶ。

#### (2) 測定項目

図-4 に、各センサの設置箇所および測定方向を示す。振動測定には、照明柱の振動測定用にひずみゲージ式加速度センサを使用し、橋桁（照明柱基底部）の振動測定用にサーボ型加速度センサを使用した。また、照明柱基部において、応力集中が予想される補強リブの溶接止端から 30mm の位置にひずみゲージを貼付した。ここで、現地での目視確認により、橋桁および照明柱の振動に方向性が認められたため、加速度の測定方向は、灯具付近および基底部においては、照明柱 A が 3 方向（橋軸直角方向・橋軸方向・鉛直方向）、照明柱 B が鉛直方向とした。また、制振装置設置位置においては、両照明柱ともに橋軸直角方向について測定した。ひずみゲージについては、両照明柱ともに橋軸直角および橋軸方向の 2 方向とした。

測定システムは、ひずみ式加速度センサについては動ひずみ測定器として(株)共和電業の DPM-8K, サーボ型加速度センサについてはアンプに(株)サンエスの PA-910 を使用した。データロガーとして(株)キーエンスの NR-2000 を使用し、これをノートパソコンに USB 接続して振動波形の連続測定を行った。また、ひずみゲージについては(株)共和電業のヒストグラムレコーダ RHS-500C を NR-2000 に接続して、振動波形の連続測定と同時に応力頻度測定を行った。サンプリング周波数は、100Hz である。

### (3) 実験概要

振動測定は、TRMD 設置前後の 2 回に分けて実施した。まず、現状確認測定(非制振時)として、装置を設置しない状態で振動測定を行い、測定結果をもとに制振対象固有振動モードを特定し、装置設置箇所および転動子質量を決定した。次に、効果確認測定(制振時)として、装置を設置して振動測定を行った。測定日時は、現状確認測定を 2002 年 4 月 3 日(水)の 6 時~18 時(12 時間)に実施し、効果確認測定は 1 週間後の 2002 年 4 月 10 日(水)の同一時間帯とした。

## 4. 現状確認測定結果

現状確認測定での各加速度センサの測定振動波形(200 秒間)と、FFT 解析により求めた周波数応答特性を照明柱 A について図-5 に、照明柱 B について図-6 に示す。また、照明柱および橋桁の卓越振動数と固有振動モードとの関係を表-1 に示す。表中の振動モード種別の判定については、区分欄において照明柱もしくは橋桁のみに●印があれば各々の固有振動モードと判定され、照明柱と橋桁ともに●印があれば、照明柱の卓越振動は橋桁の振動による強制振動成分であると判定される。以下に、橋桁および照明柱の振動性状について述べる。

### (1) 橋桁の振動性状

橋桁の振動性状を把握するため、Ch5~Ch7 および Ch10 に着目した場合、鉛直方向の振動が大きな加速度振幅を示しており、支配的であることがわかる。また、周波数応答特性において、鉛直および橋軸直角方向で、2~4Hz の周波数帯に複数の卓越したピークが現れている。特に、鉛直方向において強い周波数依存性が見られ、卓越振動モードが確認される。これに対し、橋軸方向においては、卓越振動

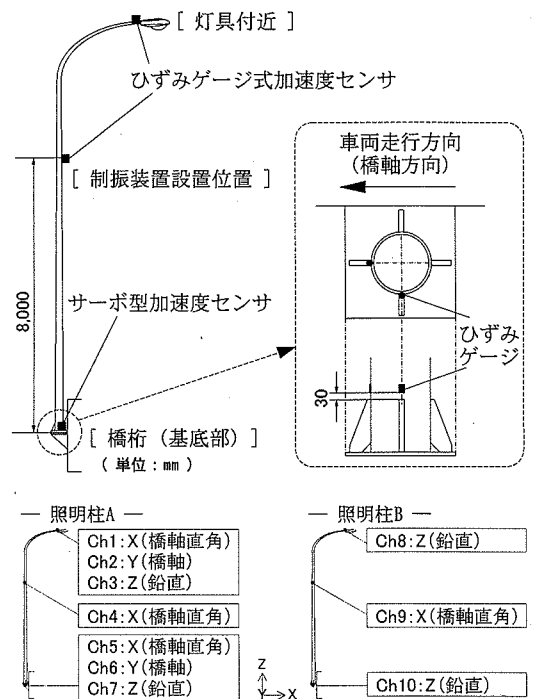


図-4 センサ設置箇所および測定方向

モードは現れていなかった。

卓越振動モードが 2~4Hz の周波数帯に集中している理由として、橋桁振動の主要原因である大型車両のバネ上振動数が一般的に約 3Hz であることから、この振動数を中心とした複数の橋桁振動モードが励起されたものと考えられる。さらに、鉛直方向が支配的であることから、橋桁のたわみ振動モードである可能性が高い。

### (2) 照明柱の振動性状

照明柱に発生している振動を特定するため、固有値解析を行った。解析モデルは 3 次元元梁モデル(節点数 70, 要素数 69)とし、灯具の質量は集中質点として与えている。境界条件は、照明柱基部を全自由度拘束とした。固有値解析結果および実測固有振動数を表-2 に示す。照明柱の面内および面外方向は、それぞれ橋軸直角および橋軸方向に対応する。実測値については、加速度測定波形の FFT 解析によるもので、照明柱 B の面外方向のみ応力測定波形を用いている。現状確認測定での実測値は、固有値解析結果に比べ低い値となっており、照明柱 A および B においても若干異なっている。これは、照明柱基部の固定条件の違いによる差であると考えられる。また、効果確認測定での実測値は、装置外殻設置に

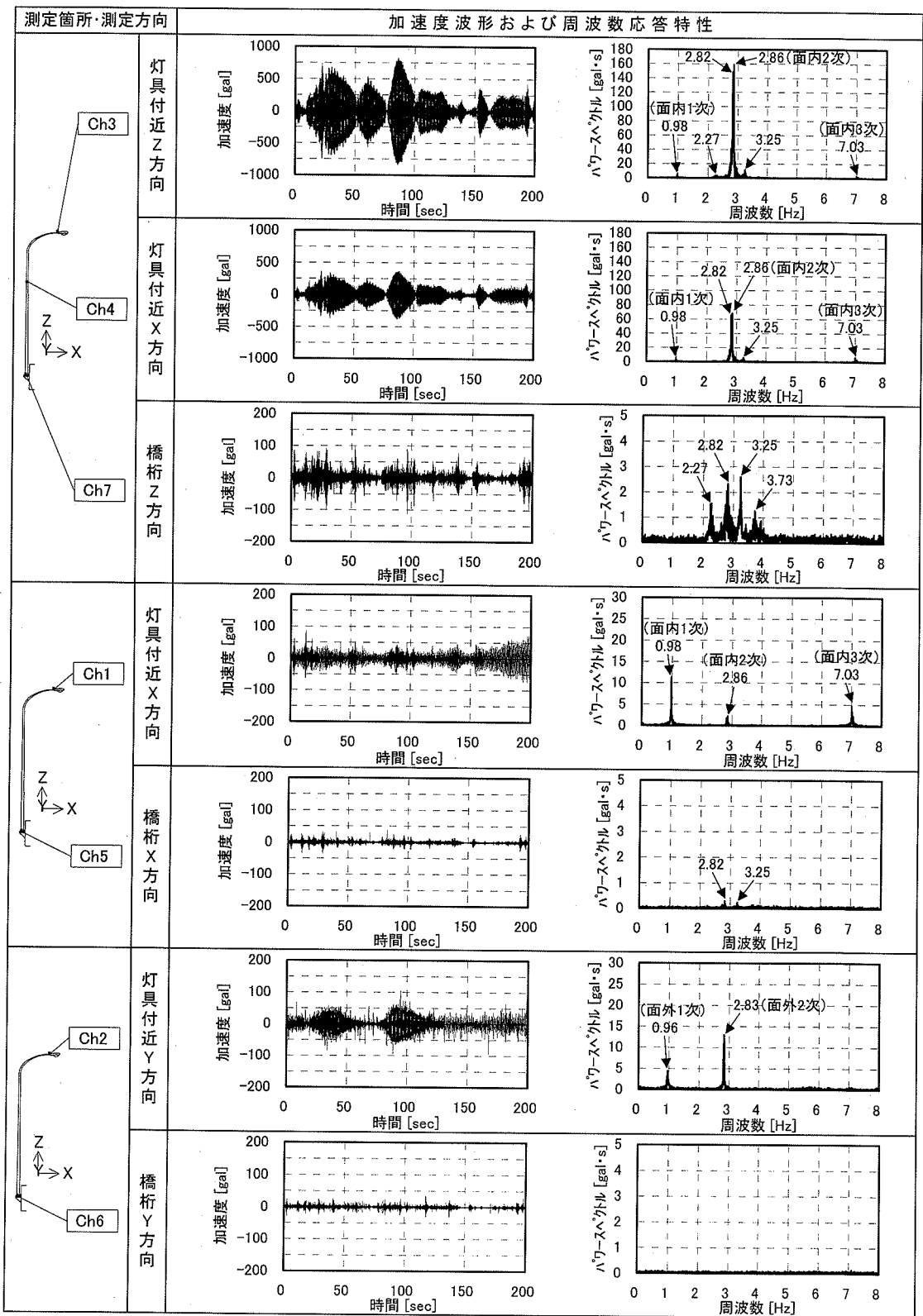


図-5 照明柱Aの現状確認測定時における加速度波形および周波数応答特性

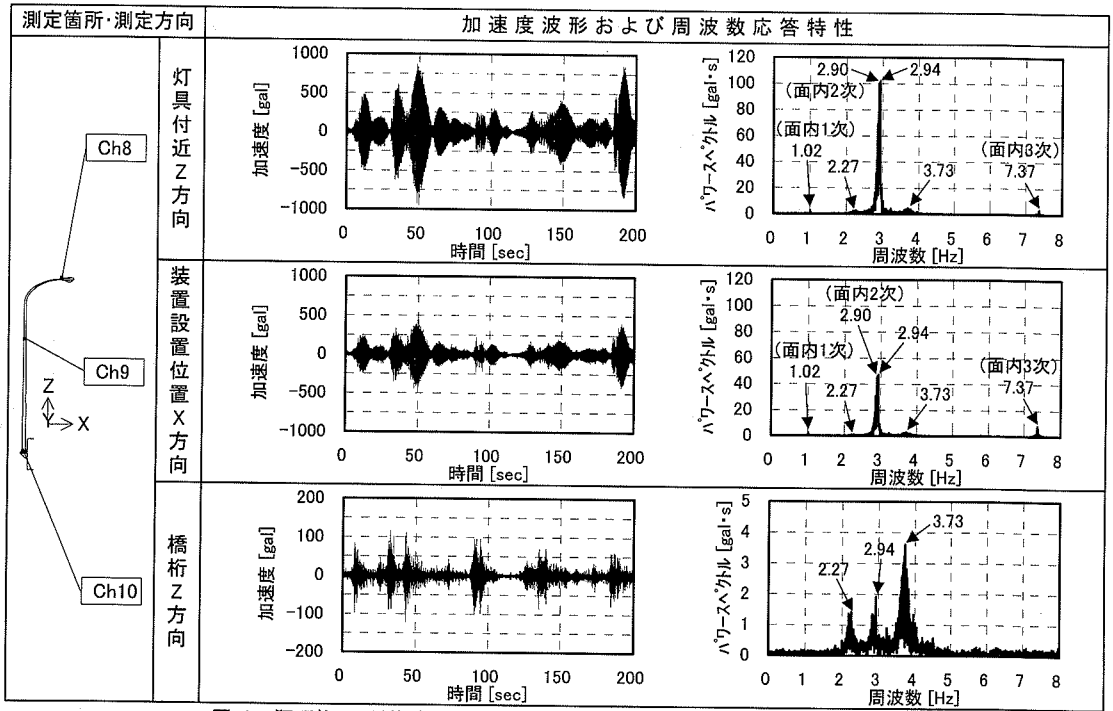


図-6 照明柱Bの現状確認測定時における加速度波形および周波数応答特性

表-1 照明柱および橋桁の卓越振動数と固有振動モードの関係

振動数 [Hz]	照明柱A			橋桁A			照明柱B		橋桁B		区分				振動モード種別
	X	Y	Z	X	X	Y	Z	Z	X	Z	照	橋	照	橋	
	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10	A	A	B	B	
0.96		○									●				照明柱A面外1次
0.98	○		○	○							●				照明柱A面内1次
1.02			○					○	○				●		照明柱B面内1次
2.27			○				○	○	○	○	●	●	●	●	橋桁振動モード1
2.82			○	○	○		○				●	●			橋桁振動モード2
2.83		○									●				照明柱A面外2次
2.86	○		○	○							●				照明柱A面内2次
2.90								○	○				●		照明柱B面内2次
2.94								○	○	○			●	●	橋桁振動モード3
3.25			○	○	○		○				●	●			橋桁振動モード4
3.73							○	○	○	○			●	●	橋桁振動モード5
7.03	○		○	○							●				照明柱A面内3次
7.37								○	○				●		照明柱B面内3次

表-2 固有振動数の数値解析結果および実測値

振動モード種別	面内方向(橋軸直角方向)			面外方向(橋軸方向)			
	1次モード	2次モード	3次モード	1次モード	2次モード	3次モード	
固有値解析結果	1.04 Hz	3.52 Hz	8.56 Hz	1.03 Hz	3.51 Hz	8.35 Hz	
照明柱A 実測値	現状確認	0.98 Hz	2.86 Hz	7.03 Hz	0.96 Hz	2.83 Hz	7.01 Hz
	効果確認	0.97 Hz	2.80 Hz	6.98 Hz	0.95 Hz	2.76 Hz	6.99 Hz
照明柱B 実測値	現状確認	1.02 Hz	2.90 Hz	7.37 Hz	0.95 Hz	2.84 Hz	7.00 Hz
	効果確認	1.00 Hz	2.85 Hz	7.32 Hz	0.94 Hz	2.76 Hz	6.98 Hz

より質量が約 2.5%増加したため、さらに低振動数側にシフトしている。

照明柱の振動性状について、周波数応答特性に着目した場合、面内および面外方向ともに固有振動モードが現れており、特に面内 2 次固有振動モードが卓越していることがわかる。これは、面内 2 次固有振動モード形状で腹となる灯具付近鉛直方向 (Ch3, Ch8) および制振装置設置位置の橋軸直角方向 (Ch4, Ch9) において、大きな加速度振幅が発生していることから確認できる。さらに、照明柱の固有振動モード以外にも複数の卓越したピークが見られる。これらのピークは、振動数が橋桁の卓越振動数と一致しており、橋桁の振動による強制振動成分である。

ここで、図-7 に示す灯具付近鉛直方向 (Ch3, Ch8) の 2~4Hz の領域での周波数応答特性に着目すると、強制振動成分の中で、照明柱 A における 2.82Hz の振動および照明柱 B における 2.94Hz の振動が特に卓越している。これらの卓越振動モードは、各照明柱の面内 2 次固有振動モードとの振動数比が  $2.82/2.86=0.99$  および  $2.94/2.90=1.01$  と、ともに 1.0 に近い値となっており、橋桁の振動との共振による振動成分であると考えられる。この共振現象の影響により、実験現場の照明柱では面内 2 次固有振動モード形状での大きな揺れが目視で確認でき、照明柱 B で球切れ、照明柱 A では球がソケットから脱落するといった二次的被害も発生していた。

また、灯具付近橋軸方向 (Ch2) においては、橋桁の橋軸方向 (Ch6) に卓越振動が発生していないにもかかわらず面外固有振動モードが現れている。これは、面内方向での揺れの影響によるもので、特に面内 2 次固有振動モードと固有振動数が近い面外 2 次固有振動モードが励起されたものと考えられる。

## 5. TRMD による対策検討

### (1) 制振対象固有振動モードへの適用

現状確認測定の結果、制振対象照明柱においては、橋桁の振動との共振により、面内 2 次固有振動モードが卓越していることがわかった。したがって、これを制振対象固有振動モードとして、TRMD による振動抑制対策を検討した。

図-8 に、TRMD の設置概要図を示す。装置設置位置については、面内 2 次固有振動モード形状 (破線) をもとに、照明柱の鉛直部において最大水平変位が発生する位置とした。TRMD により照明柱の水平方向の振動を抑制することで、結果的に灯具の

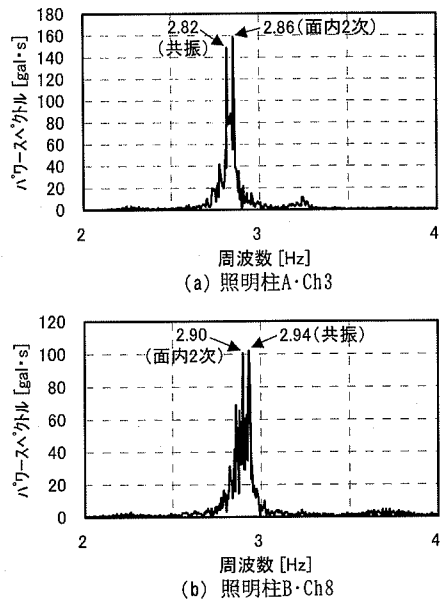


図-7 灯具付近鉛直方向の周波数応答特性

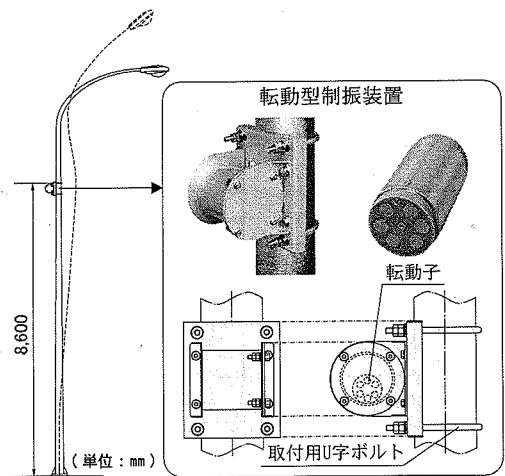


図-8 TRMD の設置概要図

鉛直方向の振動も抑制することが可能となる。以下に、装置の諸元について述べる。

制振装置設置位置での面内 2 次固有振動モードの試算有効質量は 225kg となり、これに対する転動子質量は 3kg (質量比:1.3%) とした。また、転動子の固有振動数は、外殻 (取付用 U 字ボルトを含む総質量が 5.6kg) を設置して実測した面内 2 次固有振動数に対し、同調比が 1.0 となるように設定した。

装置の減衰率は、照明柱一 TRMD 連成振動系における周波数応答解析により決定した。この際、照明柱を 1 質点系とし、固有振動数および減衰率は、

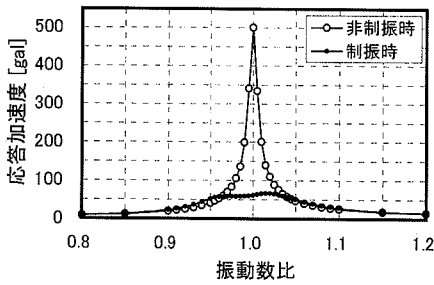


図-9 強制振動解析結果

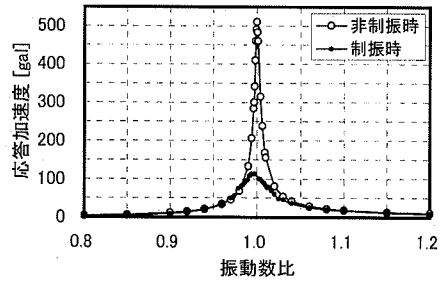


図-11 強制振動実験結果

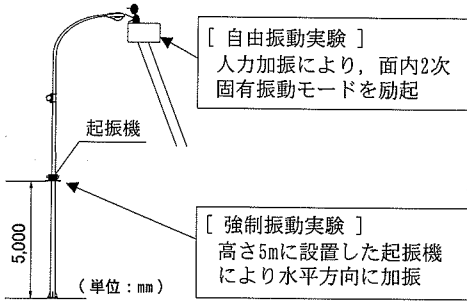


図-10 TRMDの基本制振性能評価実験概要図

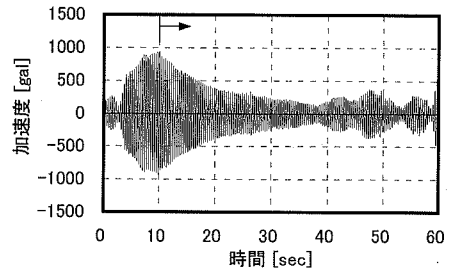
現状確認測定時の外殻設置状態での自由振動波形から評価した値を用いている。また、制振装置設置位置での制振目標加速度を 500gal とし、非制振時の最大応答加速度がこの値となるように、調和地盤振動の振幅を設定している。解析の結果得られた装置適正減衰率 6.2%での周波数応答特性を図-9 に示す。

磁気ダンパについては、外殻蓋に厚さ 5mm の銅円板を使用し、永久磁石としてネオジウム磁石 ( $\phi 15-10$ ) を使用している。永久磁石の個数は 6 個で、これを転動子側面の中心から半径 20mm の同心円上に等間隔に配置した。さらに、隣接した永久磁石の磁極を反転させることで、より有効に減衰力が得られるようにしている。永久磁石と銅版の距離は約 1mm となっている。磁気ダンパの減衰率は、測定用の外殻および転動子を用いての自由振動測定より評価しており、実機の装置減衰率は、照明柱 A 用で 6.0%、照明柱 B 用で 5.9%となっている。

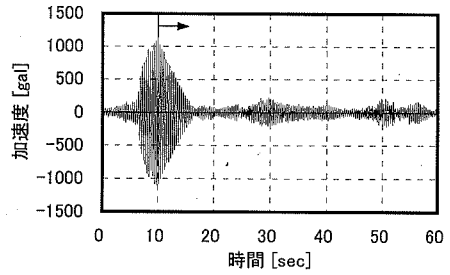
## (2) TRMDの基本制振性能

実橋実験で適用した実機の基本制振性能を評価するため、強制振動実験および自由振動実験を実施した。実験概要図を図-10 に示す。

強制振動実験については、制振対象照明柱と同じ形式の照明柱を当社敷地内に設置して実験を行った。起振機として(株)サンエスの SSV-105 を使用し、これを地上 5m の位置に設置して水平方向に加振して



(a) 非制振時



(b) 制振時

図-12 自由振動実験結果

いる。制振装置設置位置での水平方向加速度の周波数応答特性を図-11 に示す。外殻および起振機設置状態での照明柱の固有振動数は 2.80Hz となり、これに対する転動子の固有振動数は 2.90Hz (同調比: 1.04) であった。このため、解析結果に比べ実験結果は、振動数比が 1.0 付近での応答加速度が大きくなっている。TRMD 設置後の最大応答加速度は、設置前の約 5分の 1 である。

自由振動実験については、実橋実験現場において転動子を外殻内に収容する前後で、照明柱灯具付近を鉛直方向に人力加振することにより面内 2 次固有振動モードを励起させ、自由振動波形を測定した。灯具付近の鉛直方向加速度の測定波形を図-12 に示す。図中の 10 秒の時点から、自由振動が始まっている。測定波形より評価した減衰率は、非制振時: 0.42% に対し制振時: 1.74% となっており、TRMD による制振効果が確認できる。

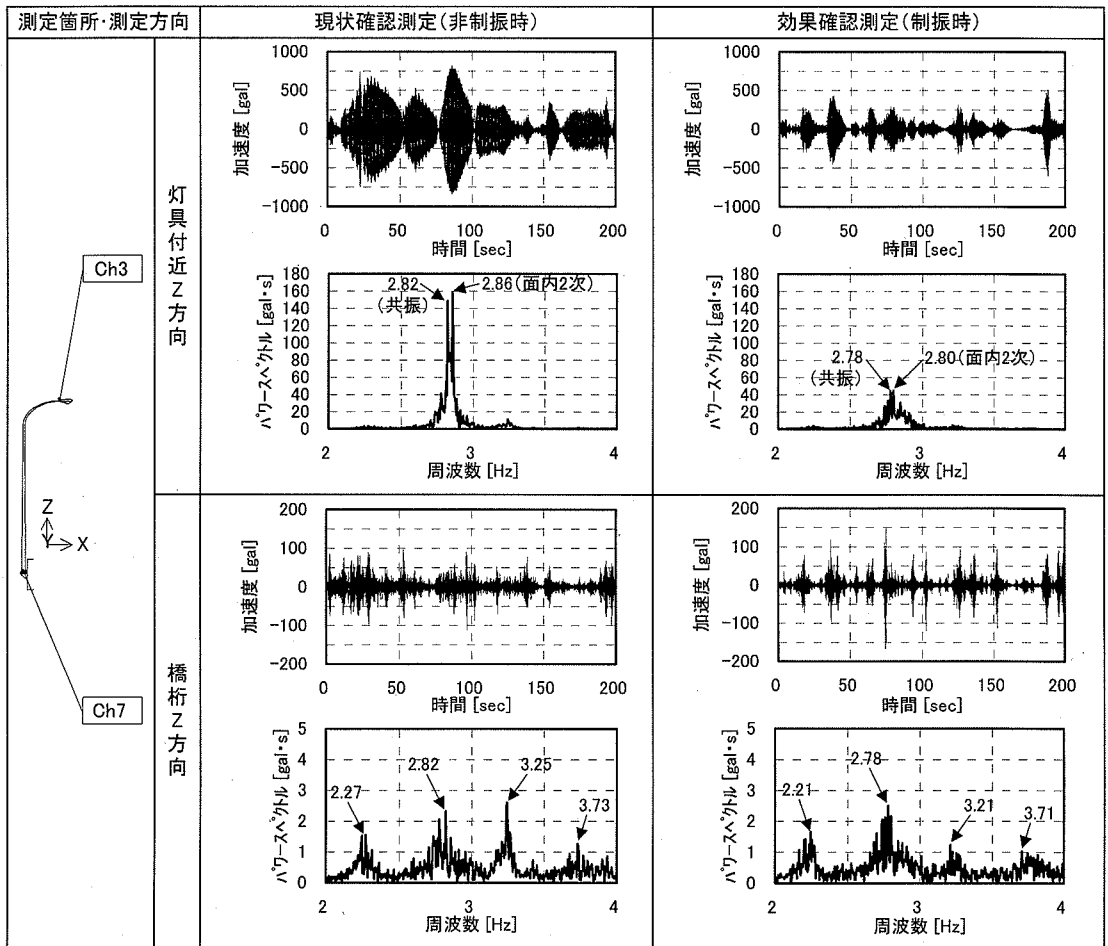


図-13 照明柱AのTRMD設置前後における測定結果の比較

## 6. 効果確認測定結果

照明柱 A について、効果確認測定での照明柱灯具付近および橋桁の鉛直方向加速度の測定振動波形（200 秒間）と、FFT 解析により求めた周波数応答特性を図-13 に示す。図中には、TRMD 設置前後の比較波形として、現状確認測定時の測定振動波形（図-5、Ch3 および Ch7）を示す。照明柱 B についても同様に、効果確認測定時の測定振動波形および現状確認測定時の測定振動波形（図-6、Ch8 および Ch10）を図-14 に示す。

橋桁の振動性状については、現状確認測定時と同様に 2~4Hz の周波数帯において複数の卓越振動モードが見られ、加速度振幅も同程度となっている。

照明柱の振動性状については、周波数応答特性に着目した場合、現状確認測定時と同様に面内 2 次固有振動モードが支配的となっている。また、照明柱の固有振動モードのほかに、橋桁の振動による強制

振動成分が確認される。その中で、照明柱 A における 2.78Hz の振動および照明柱 B における 2.96Hz の振動は、各照明柱の面内 2 次固有振動モードとの振動数比が  $2.78/2.80=0.99$  および  $2.96/2.85=1.04$  とともに 1.0 に近い値となっており、効果確認測定時においても共振による振動成分が現れていることがわかる。しかし、パワースペクトル密度は現状確認測定時に比べ 3 分の 1 以下に抑制されており、TRMD による制振効果が確認できる。加速度波形においても、TRMD の設置により両照明柱ともに共振による加速度振幅の増幅が抑制されており、振動の減衰時間も短縮されている。この結果、現状確認測定時に見られた照明柱の共振による面内 2 次固有振動モード形状での大きな振動変形が大幅に抑制され、見た目による不安感も緩和された。



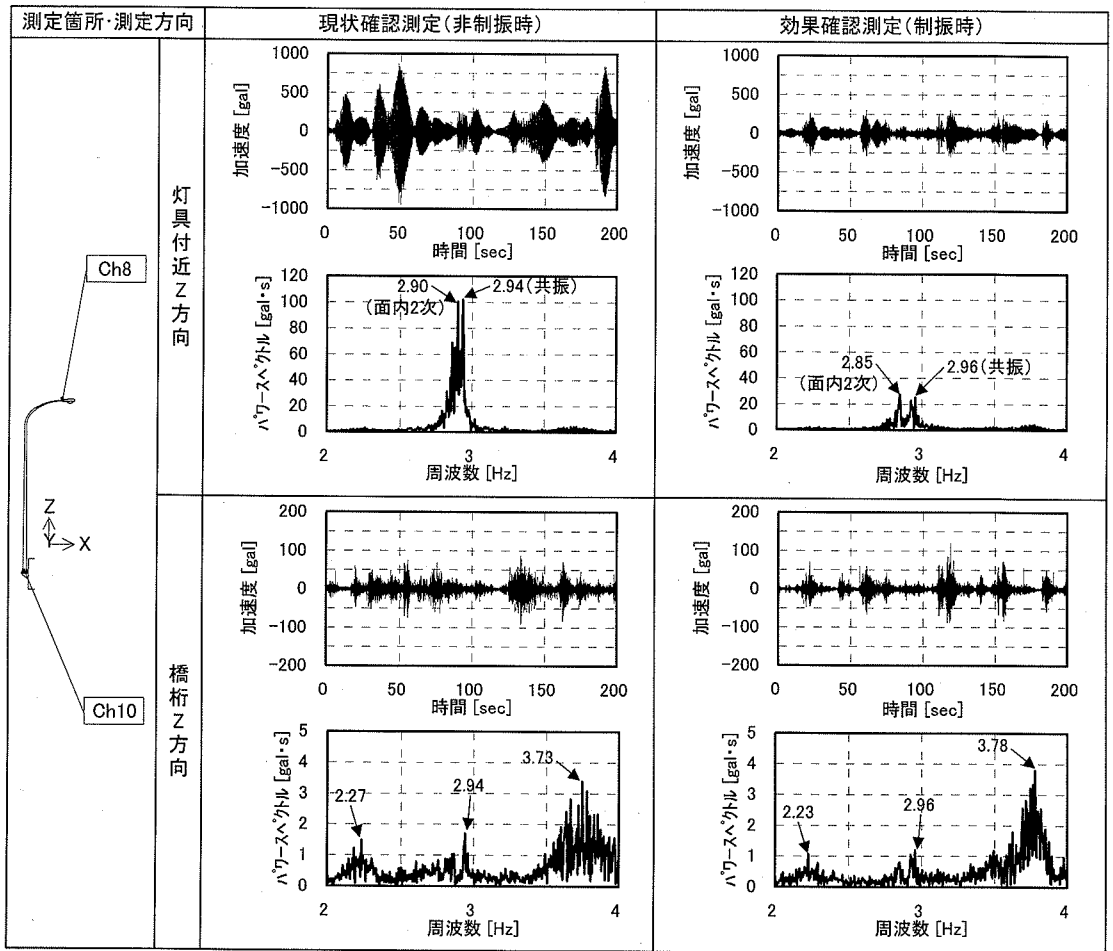


図-14 照明柱BのTRMD設置前後における測定結果の比較

## 7. 応力頻度測定結果および疲労寿命解析結果

照明柱基部において、補強リブの溶接止端から30mmの位置にひずみゲージを貼付し、面内および面外方向について応力頻度測定を実施した。測定時間は12時間(6時~18時)とし、測定にはヒストグラムレコーダを使用した。頻度計数方法として1次元レイフロー法を適用し、応力範囲の離散化はひずみ量:0~400 $\mu$ を40スライスとしている。

TRMD設置前後での測定結果を比較する上での参考データとして、実験実施日における現場付近の時間別交通量を図-15に示す。測定実施時間帯においては、15時以降で全車両交通量に差が見られるが、橋桁の振動の主原因と考えられる大型車両の交通量に大差は認められない。

### (1) 応力頻度測定結果

各照明柱における応力頻度分布図を図-16および

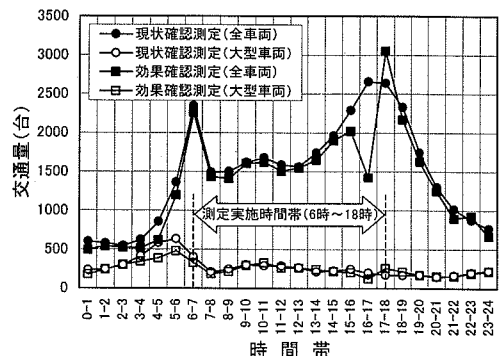


図-15 実験現場付近の時間別交通量

図-17に示す。

面内方向においては、TRMDの設置により各応力範囲における発生頻度が大幅に抑制されていることがわかる。応力範囲4.12MPa以下で装置設置後に発生頻度が高くなっているのは、TRMDの制振効果により高応力範囲で抑制された発生頻度が低応力

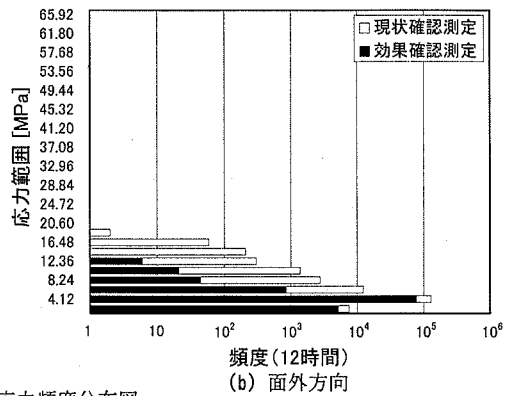
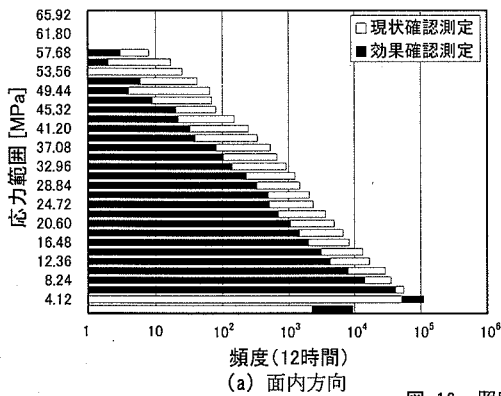


図-16 照明柱Aの応力頻度分布図

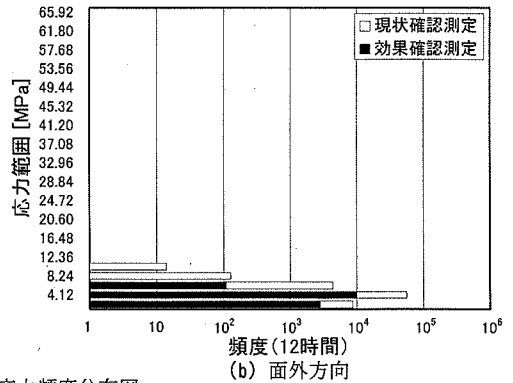
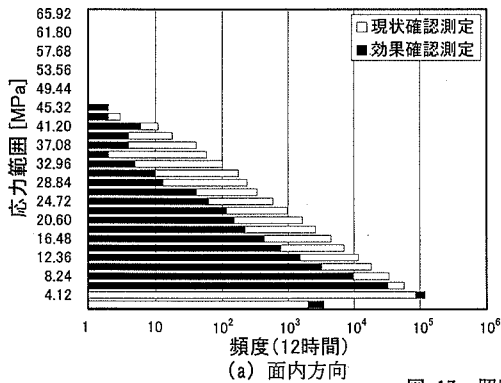


図-17 照明柱Bの応力頻度分布図

範囲側へシフトした結果であると考えられる。ただし、照明柱基部の疲労寿命にはほとんど影響を与えない応力範囲である。

面外方向においては、TRMD 設置後で最大応力範囲および応力頻度がともに減少している。これについて、図-18 に示す装置設置後の灯具付近橋軸方向 (Ch2) の周波数応答特性に着目した場合、装置設置前 (図-5, Ch2) に対し、面外 1 次および面外 2 次固有振動モードの卓越成分が 2 分の 1 以下に低減されている。これは、面内 2 次固有振動モードが抑制されたことで、その影響を受けて発生していた面外方向の固有振動モードも抑制されたもので、面外方向の発生応力の低減は、この二次的な制振効果によるものと考えられる。また、このことから、TRMD 設置による面外方向への悪影響は現れていないことが確認される。

## (2) 疲労寿命解析結果

照明柱基部の補強リブ上端部の疲労強度は、山田ら<sup>20)</sup>の疲労試験結果によれば「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」<sup>21)</sup>に示されている疲労設計曲線の強度等級 F 程度であり、安全側を見て強度等級 G

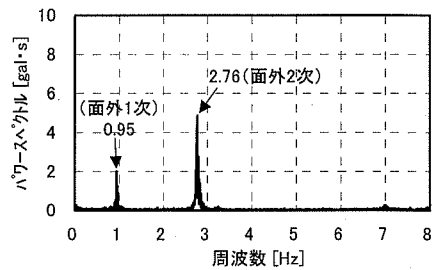


図-18 TRMD設置後における照明柱A灯具付近橋軸方向の周波数応答特性

が妥当であるとしている。変動振幅応力に対する打ち切り限界としての応力範囲は、強度等級 F が 21MPa、強度等級 G が 15MPa である。

応力頻度測定結果が 1 年間継続して発生すると仮定し、強度等級 F および G の疲労設計曲線を適用して解析した疲労寿命を表-3 に示す。

面外方向については、現状確認測定での照明柱 A においてのみ強度等級 G の打ち切り限界を超える応力範囲での頻度が発生しているが、このときの試算疲労寿命は 1237 年であり、十分に耐用年数を満たすものとする。

表-3 疲労寿命解析結果

		照明柱A				照明柱B			
		面内方向		面外方向		面内方向		面外方向	
		現状確認	効果確認	現状確認	効果確認	現状確認	効果確認	現状確認	効果確認
強度等級F 打切り限界 (21MPa) 考慮	総繰り返し数	13950	2737	0	0	2535	268	0	0
	疲労損傷度 [ /日]	1.33E-03	2.38E-04	-	-	1.74E-04	1.88E-05	-	-
	等価応力 [MPa]	29.70	28.80	-	-	26.62	26.82	-	-
	試算疲労寿命 [年]	2.1	11.5	∞	∞	15.7	145.5	∞	∞
強度等級G 打切り限界 (15MPa) 考慮	総繰り返し数	33880	7273	61	0	11231	1075	0	0
	疲労損傷度 [ /日]	3.91E-03	7.44E-04	2.21E-06	-	7.89E-04	7.88E-05	-	-
	等価応力 [MPa]	24.34	23.39	16.56	-	20.63	20.93	-	-
	試算疲労寿命 [年]	0.7	3.7	1237.0	∞	3.5	34.8	∞	∞

面内方向についての解析結果は、TRMD の設置により照明柱の疲労寿命が大幅に改善されることを示している。ただし、現状確認測定での解析結果は従来の照明柱の耐用年数を下回る値となっており、照明柱 A の強度等級 G では 1 年を切る疲労寿命となっている。応力頻度測定時間が 12 時間であることから、ここで示した解析結果はあくまで参考値である。しかし、疲労寿命解析結果から、本実験現場の照明柱においては、橋桁の振動との共振により、疲労強度上無視できない応力が発生していたものと推測される。

## 8. まとめ

本実橋実験では、一般供用下の高速道路高架橋上に設置された照明柱を対象として、交通車両の走行荷重による橋桁の振動を原因とする照明柱の揺れに対し、振動測定により振動性状を把握するとともに、転動型制振装置 (TRMD) による振動抑制対策を実施した。本実橋実験で得られた所見を以下にまとめる。

(1) 照明柱が設置されている橋脚中間点付近の橋桁においては、鉛直方向の振動が支配的であり、2~4Hz の周波数帯に複数の卓越振動モードが確認された。これは、高架橋を通過する大型車両の走行荷重により、大型車両のバネ上振動数：3Hz を中心とした橋桁の振動モードが励起されたものと考えられる。

(2) 照明柱においては、面内 2 次固有振動が支配的であり、橋桁の振動との共振による振動成分が確認された。このため、TRMD 設置前では面内 2 次固有振動モードでの揺れが増幅され、灯具の鉛直方向の大きな揺れが目視で確認された。

(3) 照明柱の面内 2 次固有振動モードに対し、TRMD による振動抑制を検討した。TRMD の設置により、橋桁の卓越振動モードとの共振成分のパワースペクトル密度が 3 分の 1 以下に抑制された。

(4) TRMD の設置により、灯具付近鉛直方向の加速度振幅の増幅が抑制され、振動の減衰時間も短縮された。これにより、灯具の揺れが収まったことで、見た目の不安感が緩和されたと同時に、灯具の球切れや球の脱落といった機能損傷の防止にも効果があるものと考えられる。

(5) 照明柱基部の補強リブ上端部において、応力頻度測定を実施した。TRMD の設置により、各応力範囲における発生頻度が減少し、強度等級 F による試算疲労寿命は照明柱 A で 2.1 年から 11.5 年に、照明柱 B で 15.7 年から 145.5 年に改善される結果となった。

以上の所見より、交通振動のような不規則な振動に起因する照明柱の振動に対して、TRMD の制振効果が実証された。照明柱や標識柱等の付帯構造物の振動問題対策として、新設の場合については、設計段階において振動を考慮するとともに、付帯構造物を設置する高架橋等の構造物の振動状況や設置場所等についても検討する必要があると言える。また、既存の付帯構造物については、設置場所や構造の変更は困難であり、予防保全や既存設備の有効活用の観点からも、本装置を代表とする制振装置による対策は、有効な手段であると考えられる。

**謝辞：** 本実橋実験での振動測定作業において、横河レンタ・リース株式会社の大道政喜氏、小暮嘉弘氏、温井裕世氏、柳沢英俊氏に協力していただいた。深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 小塩達也, 李相勳, 山田健太郎, 森成顕, 森下宣明: 交通荷重による標識柱の振動と疲労耐久性, 土木学会構造工学論文集 Vol.47A, pp.1009-1017, 2001.
- 2) (社)日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 3) 山田勝彦, 飯田毅, 和泉有祐, 多田仁志: 照明柱の

- 風による振動とチェーンダンパの制振効果（その 1. 現地計測と小型模型振動実験），土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.666-667，1988.
- 4) 和泉有祐，山田勝彦，渡辺奉昭：照明柱の風による振動とチェーンダンパの制振効果（その 2. 実大振動実験），土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.668-669，1988.
- 5) 和田克哉，恵谷瞬吾，東田弘實，高野晴夫：横浜ベイブリッジの耐風対策，橋梁と基礎，Vol.89，No.8，pp.43-48，1989.
- 6) 森口学，吉村幸治，吉川賀庸：1 号東山高架橋制振装置内蔵型照明柱について，建設電気技術 2002 技術集，pp.124-126，2002.
- 7) 近藤隆行，佐伯秀，島崎洋治：転動型制振装置に関する基礎的研究，土木学会第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集，第 I 部門，pp.146-147，1998.
- 8) 佐伯秀，森尻渉，島崎洋治：強制振動に対する転動型制振装置の有効性に関する研究，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.930-931，1998.
- 9) 佐伯秀，尾畑守夫，島崎洋治：1 自由度系せん断型ラーメン構造模型に対する転動型制振装置の数値シミュレーション，土木学会第 26 回関東支部技術研究発表会講演概要集，第 I 部門，pp.102-103，1999.
- 10) 尾畑守夫，佐伯秀，島崎洋治：転動型制振装置の非線形性を考慮した理論およびシミュレーション，土木学会第 26 回関東支部技術研究発表会講演概要集，第 I 部門，pp.104-105，1999.
- 11) 尾畑守夫，森尻渉，佐伯秀，島崎洋治：複数個設置した転動型制振装置の制振効果，土木学会第 27 回関東支部技術研究発表会講演概要集，第 I 部門，2000.
- 12) 尾畑守夫，森尻渉，島崎洋治：転動型制振装置の自由振動における制振効果，土木学会構造工学論文集，Vol.47A，pp.381-391，2001.
- 13) 尾畑守夫，森尻渉，島崎洋治：照明柱に対する TRMD の制振効果，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.1195-1196，2002.
- 14) 長屋幸助，小島宏行：長方形磁束と長方形導体を合わせた磁気ダンパの形状特性，日本機械学会論文集 C 編，Vol.47，No.424，pp.1620-1625，1981.
- 15) 長屋幸助，小島宏行：円形磁石と任意形状導体より構成される磁気ダンパの研究（第 1 報，減衰係数の解析），日本機械学会論文集 C 編，Vol.50，No.453，pp.806-811，1984.
- 16) 長屋幸助：円形磁石と任意形状導体より構成される磁気ダンパの研究（第 2 報，応用および数値計算結果），日本機械学会論文集 C 編，Vol.50，No.453，pp.812-818，1984.
- 17) 長屋幸助，関口肇：反転磁極の組合せによる高減衰磁気ダンパの開発とその解析，日本機械学会論文集 C 編，Vol.57，No.544，pp.3800-3805，1991.
- 18) 浅見敏彦，細川敏延：磁気ダンパに関する実用設計式の提案，日本機械学会論文集 C 編，61-582，pp.587-590，1995.
- 19) 背戸一登：磁気減衰を活用した振動制御法，日本機械学会論文集 C 編，Vol.56，No.525，pp.1079-1086，1990.
- 20) 山田健太郎，近藤明雅，小林且典，宮本伸治，荒木準一：鋼管柱基部の疲労強度，土木学会構造工学論文集，Vol.38A，pp.1045-1054，1992.
- 21) (社)日本鋼構造学会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，pp.5-6，技報堂出版，1993.

(2003.3.4 受付)

## DAMPING EFFECTS OF TUNED ROTARY-MASS DAMPER ON THE VIBRATION OF A LIGHTING POLE

Morio OBATA, Wataru MORIJIRI and Yoji SHIMAZAKI

Tuned Rotary-Mass Damper (TRMD) is a type of passive dynamic damper which can reduce the vibration of the structure by using the control power generated by the rolling movement of a rotary-mass. In order to verify the effectiveness of TRMD, we applied TRMD to the vibration of a lighting pole on a highway bridge. The 2nd inplane vibration mode of the lighting pole was resonant with the vibration of the highway bridge caused by the vehicles. As a result of the application of TRMD, the vibration of the lighting pole was reduced. In addition, we measured the strains near the base of the lighting pole and determined that the fatigue life of the lighting pole was extended.