

照明柱用「円板鋼球型」制振装置の開発

A STUDY OF THE NEW TYPE DAMPER FOR A LIGHT POLE

角 和夫^{*} 本庄 隆^{**} 森北一夫^{***}
有馬健次^{****} 南條正洋^{*****}

BY Kazuo SUMI, Takasi HONJO, Kazuo MORIKITA,
Kenji ARIMA and Masahiro NANJO

Recently, the chain damper, the impact damper and others, are installed in lighting poles set up on large bridges over sea with long span for preventing wind-vortex vibration. These damper have good damper efficiency. The lighting pole, designed for the access bridge for the New Kansai International Airport, is expected to meet the problem of wind induced vibration. The authors developed the new type damper for lighting pole, which have circular steel plates and small steel balls in cylinder. The new type damper is confirmed to be available for decreasing amplitude of the vibration by the full scale model tests on the bridge.

1. 緒 言

近年、高速道路の整備に伴い海上に建設される長大橋用の照明柱では、通常の街路や高速道路のそれらに比べて一様な自然風が吹く機会が多く、風による渦励振振動現象による基礎部の疲労強度や照明器具の破損の問題が生じ易い。従って、長大橋の付属設備である照明柱の場合には風による振動発生の有無について通常検討されている。最近では、大鳴門橋で採用された八角テーパ型照明柱について実橋実験により渦励振現象の発生を予想して、チェーンダンパーによる防振対策を行い大きな成果が見られた。¹⁾²⁾ この成果をきっかけに、種々のダンパーが研究開発されてきた。³⁾⁴⁾

今回、関西新空港連絡橋に設置予定された照明柱は、大鳴門橋と同様に、八角テーパ型であり渦励振振動

-
- * 工修 関西国際空港(株)工務二課設計課設計四係長(大阪市中央区南船場3丁目1番10号)
 - ** 工修 那須電機鉄工(株)技術開発部大阪室室長(大阪市西淀川区中島2丁目12番5号)
 - *** 那須電機鉄工(株)技術開発部大阪室主任(同上)
 - **** 工博 (株)ニチゾウテック 技術本部第二技術部部長(大阪市此花区桜島一丁目2番23号)
 - ***** 工修 (株)ニチゾウテック 技術本部第一技術部部長(同上)

の発生が予想された。この渦励振振動特性及び固有振動特性を明かにする為に、実機と同仕様の実験用照明柱を現地に建柱し自動振動計測・固有振動計測を各々実施した。同時に、円板と鋼球からなる新しい型の制振装置「円板鋼球型」・「張力弦型」についての基礎実験による制振効果の検討を行った。⁸⁾ この後、この円板鋼球型制振装置を実験照明柱に取付け自動計測により渦励振振動の抑制効果を確認した。

2. 照明柱の振動特性

2. 1 構造・諸元

制振対象とした照明柱は関西新空港連絡橋に設置する1灯用・2灯用照明柱であり、その外観図を図. 1 に示す。照明器具取付張り出し部は、1灯用では1000mm・1800mm、2灯用では1000mmの長さである。ただし、本論文では固有振動数が低い張り出し部1800mmの1灯用照明柱（以降1灯柱と呼ぶ）と2灯用照明柱（以降2灯柱と呼ぶ）を対象とした。柱断面形状は正八角形であり、対辺径比1/100のテーパがついている。

設計仕様としては、柱の強度面からの仕様が基本風速50m/sに耐えることであり、振動面からの仕様がアーム先端部加速度が1.2G以下であること（照明器具破損防止）が決められている。⁵⁾

2. 2 照明柱の振動特性

(1) 固有振動

1灯柱と2灯柱を関西新空港連絡橋の空港島側のトラス橋端部に風速計取付柱と共に設置して（図. 2）、風による自励振動の計測を行う前に固有振動を把握する打撃実験を実施した。柱本体上端部（測点2）の加速度とインパルスハンマーで各測点を面外・面内方向に*打撃して得た加振力との関係である伝達関数の実測値から、モーダル解析により本照明柱の固有振動特性を求めた。図. 3には1灯柱の面内振動の解析結果例を示す。同図の上段に伝達関数、下段に振動モードを示す。伝達関数の黒点は実測値であり、実線はカーブフィット処理（多点近似法）して得られた計算値である。⁷⁾ 表. 1は打撃実験で得た固有振動の実測値である。同表には有限要素法（汎用プログラム”SAPV”を使用）を用いて計算した理論値をも併記した。

(a) 1灯柱

面外・面内振動共に柱本体の曲げ振動主体である1次と3次の間に理論値から判断して張り出し部振動主体である2次振動が認められる。表. 1では実測値と理論値とは振動数・振動モードに於て比較的良く一致しているが、1次固有振動数の実測値が計算値よりかなり低い。これは照明柱基礎部の固定条件が計算で仮定した完全固定と異なりばね支持に近い為と考えられる（柱基礎部は床版より高欄部外側へ橋軸直角方向に張り出した部材に取り付けられている）。山田ら³⁾が実施した振動実験での固有振動特性と本計測で得たものは類似している。すなわち、本照明柱の高さは上記文献のものより若干高く、その固有振動数は低い傾向であるが、1次振動数に対する高次振動数の比率はほぼ等しい。

(b) 2灯柱

表. 1に示す様に面外・面内振動共に実測値・理論値が1灯柱に比較して良く一致している。特に、一次固有振動数の実測値・理論値の差は少なく、これは柱基礎部が剛性の高い中央分離帯に設置されているので（図. 2）、基礎部固定条件が完全固定に近い為と推定できる。面外・面内振動の振動モード形状が類似している各次数の振動数は、3次振動を除いて、互いに近い値を示している。すなわち、3次振動の振動モードの形状差が他次数に比べて大きい為に、3次振動数の差は大きくなっている。

* 面内方向打撃は、張り出し部測点については不可能であり本論文では省いた。

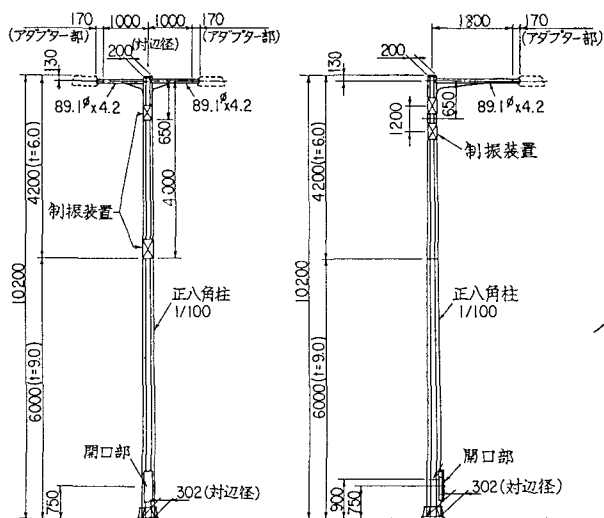


図. 1 制振対象照明柱

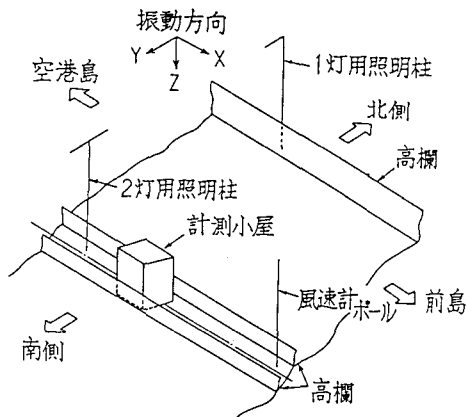


図. 2 (a) 計測場所概念図

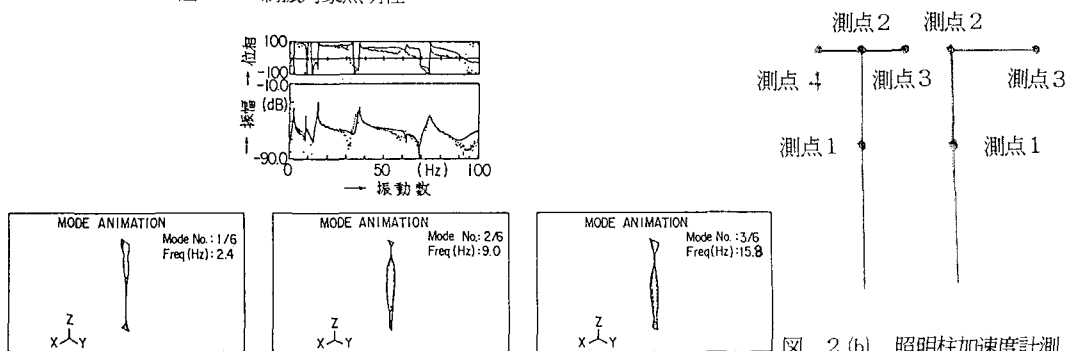


図. 2 (b) 照明柱加速度計測点

図. 3 モーダル解析結果例 (1灯柱)

表. 1 照明柱固有振動 (理論値と実測値)

(a) 2灯柱

	面 外		面 内	
	理 論	実 測	理 論	実 測*
1 次	2.49Hz	2.48Hz	2.54Hz	2.53Hz
2 次	12.82Hz	12.23Hz	11.27Hz	10.49Hz
3 次	27.43Hz	24.72Hz	19.66Hz	17.61Hz
4 次	42.34Hz	38.04Hz	41.86Hz	35.80Hz

(b) 1灯柱

	面 外		面 内	
	理 論	実 測	理 論	実 測*
1 次	2.76 Hz	2.53 Hz	2.72Hz	2.44Hz
2 次	7.52Hz	7.49Hz	9.15Hz	8.99Hz
3 次	15.87Hz	14.99Hz	15.96Hz	15.82Hz
4 次	41.10Hz	36.67Hz	39.92Hz	36.89Hz

* 張り出し部振動モードは理論値のみ

(2) 減衰特性

制振効果を評価する1つの方法として、制振装置取付前後での減衰率の増加を見ることがある。本論文では、現地に設置した実験用照明柱の減衰率を求める自由振動実験を行った。1次振動に対しては照明柱上端部を人力で面外・面内の強制変位加振、高次振動に対しては柱本体中間部（2次振動の振幅の大きい部位）への面外・面内打撃加振を各々行って生じた自由振動波形を計測した。

図. 4は1灯用照明柱の面内・面外振動の1次・2次の柱本体上部測点の実測波形例を示す。1次振動の振動振幅は10mmのオーダーであるが、2次振動のそれは0.2mmと極端に小さい。これが1次・2次振動の減衰率の値の差の原因の1つと考えられる。これらの減衰率の実測値 δ_p を表. 2に示す。これらの値は山田ら²⁾が得た値に比べてかなり小さい。この原因は種々考えられるが、照明柱の構造の違いや起振方法などの違いが主要因であろう。

2.3 渦励振振動特性

(1) 共振風速

本照明柱と同じ八角断面柱が風により振動する条件は、ストローハル数 S_t が

$$S_t = f \cdot D / V = 0.17 \quad (1)$$

であることは、風洞試験より知られている。⁴⁾式(1)を用いて表. 1の1～3次の実測固有振動数 f 、照明柱本体中間断面径 $D=0.25$ mから、共振風速 V を算定すると、表. 3になる。

本表より、比較的低風速である3.6～3.7m/s程度で面内・面外の自動振動が1灯用・2灯用共に発生することが予想できる。さらに、強風域の10～26m/sに於ても共振風速が存在している。これらの共振風速付近の振動現象を把握する目的で自動計測を実施した。

(2) 現地振動自動計測（制振装置取付前）

(a) 計測方法

図. 2に示す様に、照明灯部に3方向の加速度計、実験用照明柱本体の頂部・中間部に各2方向の加速度計を取付け、照明柱付近に設けたボールに取り付けた風速計を含めた自動計測システム（図. 5）による自動計測を約1ヶ月間実施した。風速2.5m/sと照明柱頂部加速度250galを計測値のどちらかが越えた場合及び定時毎（30分毎）に計測を行った。

(b) 計測結果

図. 6(a)は風速と1灯柱頂部加速度の実測値である。1灯柱の最大振幅発生風速は $V=3.5$, 8.6 m/sであり、これらの風速は表. 3に示す共振風速より一次振動ではやや低く2次振動ではかなり低い値である。これは表. 3の共振風速算定に用いた柱径 D が中間断面であるが、実際の代表断面はもう少し高い径の小さい断面と考えられる。この原因は、図. 2に示す様に、1灯柱が設置されている高欄外部張り出し部で風の吹上による代表断面径の減少であろうと推定される。2灯柱は中央分離帯に設置されているので、図. 6(b)に示す様に、2灯柱の最大振動振幅が発生する風速は3.8m/sであり、風の吹上ががなく表. 3の推定値とほぼ一致している。2次振動については、実測最大風速が共振風速に達しておらず、渦励振現象が発生しなかったと考えられる。

図. 7は1灯柱の風向と振動振幅の関係を示すが、振動振幅の大きい面外 x 方向（橋軸）は風向（北）と直角方向であり、渦励振であることが分かる。2灯柱についても同様な結果が得られた。同図には、平均風速・風向を示すグラフを併記したが、観測時期の冬期である季節風の西から北方向が多いことを示している。

3. 制振装置の検討

3.1 新しい制振装置

図. 8に著者らが新たに考案した”円板鋼球型”と”張力弦型”の照明柱制振装置の概略を示す。

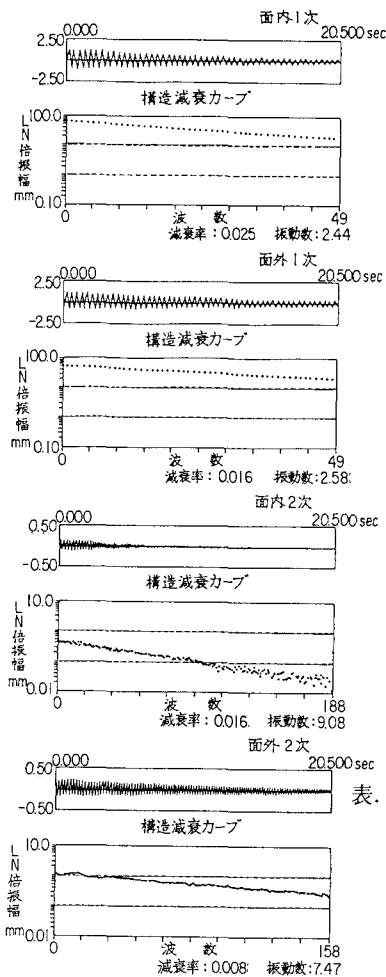


図. 4 1灯柱減衰率測定結果
(制振装置取付前)

表. 2 照明柱対数減衰率(実測値)

振動種類	1灯柱	2灯柱
1次	0.025	0.016
面内		
2次	0.016	0.014
面外		
1次	0.016	0.016
2次	0.008	0.009

表. 3 共振風速 単位: m/s

振動種類	1灯柱	2灯柱
1次		
面内	3.6	3.7
面外	3.7	3.6
2次		
面内	13.2	15.4
面外	11.0	18.0
3次		
面内	23.3	25.9
面外	22.0	36.4

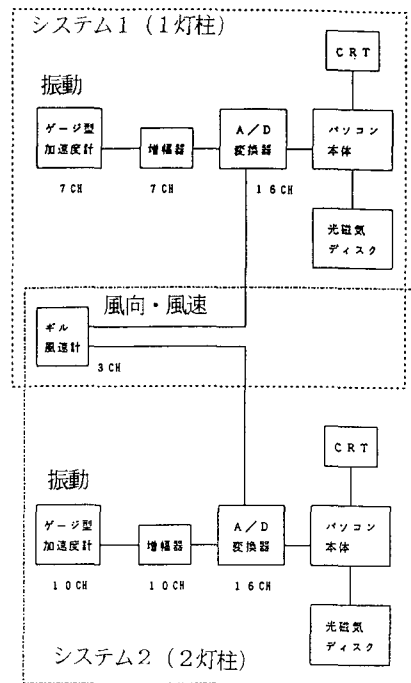


図. 5 自動計測システム

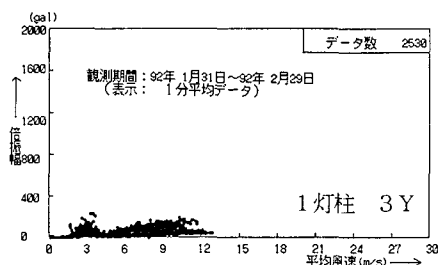
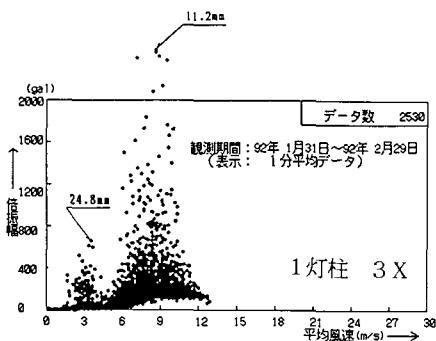


図. 6 (a) 風速と振動振幅の関係 (1灯柱)

円板鋼球型は円筒内に厚みのある円板の間に鋼球を挟み、各円板の水平の動きを滑らかにして円筒内面に当てる制振装置である。これは照明柱に付加減衰を与えて振動を低減しようとするものである。一方、張力弦型は円筒内に円柱型ウェイト及びそれを支持するワイヤからなる質量・ばね系の動吸振器である。これらの材質は発錆の少ない SUS 製としたが、表. 4 にこれらの主な寸法・重量を示す。照明柱の振動重量が 200Kgf 前後であるので（表. 7）、制振装置可動部重量は重量による制振効果が認められる照明柱振動重量の 3～5% となる重量に設定した。⁶⁾

3. 2 ばね支持実験⁸⁾

(1) 実験方法

図. 9 はばね支持実験装置の概要である。本装置はマス・ばねからなる 1 自由度振動系であり、自由振動波形を計測して対数減衰率を算定するものである。マスへの制振装置の取付有無による付加減衰率の大小により制振効果の評価を行った。

照明柱の風により誘起される固有振動数である 2.5Hz・7.5Hz（表. 1）を対象にした実験を行うべく表. 5 に示したマス重量・ばね定数を設定した。自由振動を発生させる起振外力は、ケース L では人力、ケース H ではチェーンブロックによる強制変位開放を採用した。実験は 3 回実施して得られた減衰率を平均した値を実測値とした。

ばね支持実験から求められた制振効果の指標である対数減衰率の増加分 $\Delta \delta_m$ から照明柱に同じ制振装置を取り付けた場合の $\Delta \delta_s$ を推定するには

$$\Delta \delta_s = (M_m / M_o) \Delta \delta_m \quad (2)$$

を用いる。ここに、M は振動質量を示し、m と p はばね支持実験可動部質量、照明柱の振動質量（有効質量）を各々示す。

(2) 実験結果

ばね支持実験装置ウェイトへの制振装置取付前後の自由振動波形実測例を図. 10（振動数 2.5Hz）、11（振動数 7.5Hz）に示す。制振装置取付前では振動波形は余り減衰せず、対数減衰率 $\delta_m = 0.005 \sim 0.003$ とかなり小さい値である。しかし、図. 10、11 に示す様に、制振装置を取り付けることにより振動波形の減衰は大きくなり、 δ_m の値が 1 桁数値が上がる。これらの実測波形から分かるが、減衰率には振動振幅依存性があり、ケース L では振動振幅 15mm, 10mm, 5mm、ケース H では 5mm, 2.5mm に於て各々減衰率の算定を行った。表. 6 が対数減衰率の実測値をまとめた表である。

3. 3 制振装置の選定

表. 6 は円板鋼球型（以降 C 型と呼ぶ）と張力弦型（以降 T 型と呼ぶ）の制振効果の顕著な差はなく両者共に制振効果が大きいことを示している。ただし、動吸振器である T 型制振装置はケース L・H（照明柱の 1 次・2 次に対応）の振動数に合うワイヤ張力を各々調整している。従って、T 型で渦励振振動を抑制するには 1 次・2 次振動用の制振装置を照明柱に取り付けることが必要である（C 型では次数に無関係で同じ諸元）。また、T 型の機構は C 型に比べて複雑であり、装置そのものの安価・メンテナンスフリーなどを考慮すると、照明柱用制振装置としては T 型より C 型、すなわち円板鋼球型が適している。

3. 4 制振効果の推定

本節では C 型制振装置を照明柱に取り付け後に期待できる付加減衰率 $\Delta \delta_s$ を推定する。2. 2 で有限要素法により得られた照明柱の固有振動モードから振動振幅の大きい点（制振装置の取付位置）に於て換算した振動重量と制振装置可動部重量を用いて式（2）より $\Delta \delta_s$ を求めると、表. 7 になる。同表と表. 2 より、照明柱の上端部・中間部付近に制振装置を取り付けた照明柱の対数減衰率 δ を式（3）で求めると、 δ が概ね 0.03 を上回り渦励振振動を十分抑制できるものと思われる。⁵⁾

表. 5 ばね支持実験の諸元

項 目 ケース名	固有振動数 (Hz)	可動部重量 (Kgf)	ばね定数 (Kgf/mm)
ケースL	2.5	115.5	29.1
ケースH	7.5	82.6	187.2

表. 6 実測対数減衰率 (ばね支持実験)

ケース名	ケースL			ケースH	
振動振幅 mm	15	10	5	5	1.5
制振装置無し	—	—	0.004	0.005	—
円板鋼球型	0.035	0.051	0.068	0.059	0.078
張力弦型	0.016	0.033	0.069	0.083	—

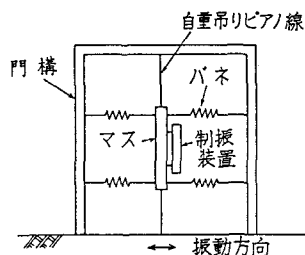


図. 9 ばね支持実験装置概略図

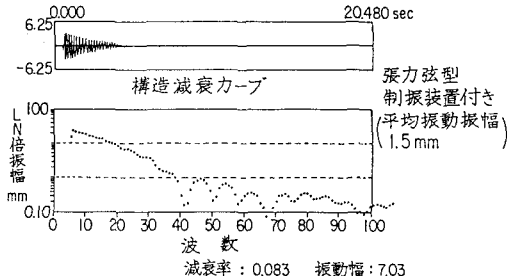
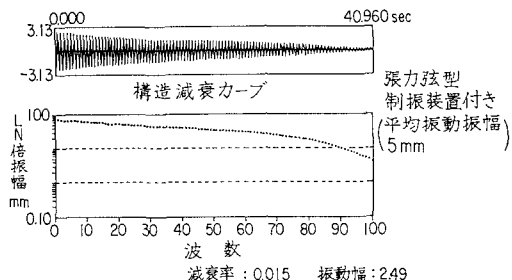
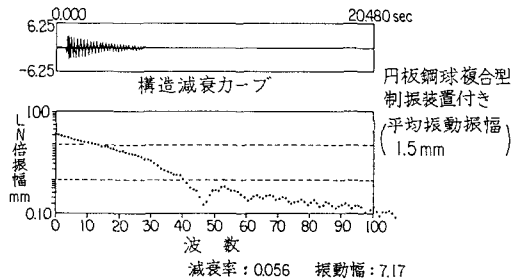
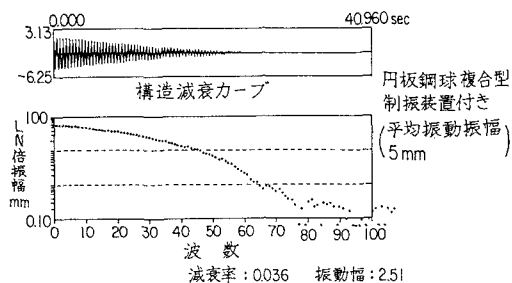
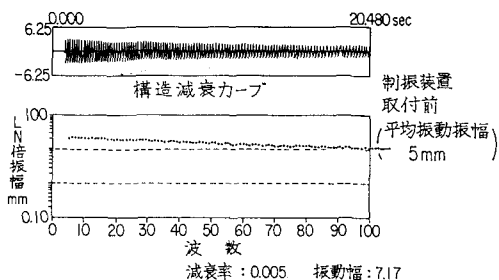
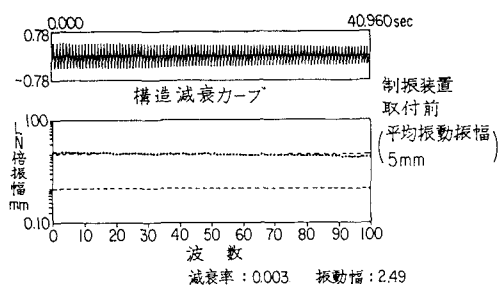


図. 10 ばね支持実験結果 (ケースL)

図. 11 ばね支持実験結果 (ケースH)

$$\delta = \delta_p + \Delta\delta_s \quad (3)$$

4. 制振効果確認現地実験

4. 1 減衰特性把握実験

現地の実験用照明柱に制振装置取付けた状態(図. 2)の減衰率を求める自由振動実験を行った(図. 1 2には実測波形を示す)。表. 7 に対数減衰率の実測値から求めた制振装置による減衰率増加 $\Delta\delta_p$ を示す。 $\Delta\delta_p$ と $\Delta\delta_s$ は余り良い一致が認められないが、制振装置取付前の減衰率 δ_p に対して大きい減衰率増加 $\Delta\delta_p$ が得られ、本制振装置の制振効果が大きいことが分かる。

4. 2 現地振動自動計測(制振装置取付後)

図. 5 に示す自動計測システムを用いて、制振装置取付後の実験用照明柱の自動計測を約1ヶ月間実施した。図. 1 3は風速と1灯柱・2灯柱照明灯部振動振幅の実測値を示すが、制振装置取付前の同測点の実測値に比べて、振動振幅は小さく共振風速域での大きいピークは認められない。計測期間中には渦励振振動を発生させる自然風が観測されており、制振装置が渦励振振動を抑制していることが分かる。制振装置取付前後の最大振動振幅比は1灯柱で1/5～1/7、2灯柱で1/3程度であり、ばね支持実験で得られた本制振装置の減衰率増加程の低減は見られないが大体対応している。このことから、ばね支持実験による制振効果の推定は妥当であることが改めて確認できた。なお、本計測終了後1灯柱について制振装置を灯頂部と中間部に取り付けて自動計測を実施したが上述と同様な結果が得られた。

5. 結 論

関西新空港連絡橋に設置される八角テーパ型の照明柱に対する制振装置として、円板鋼球型を考案し、この制振特性を明かにするばね支持実験及び実機照明柱を用いた制振効果確認振動計測を実施した。これらの実験結果から明かになった事柄は以下の通りである。

- (1) 1灯用・2灯用照明柱の1次固有振動数は面外・面内共に2.5Hzに近く、共振風速は3.5～3.8m/sとかなり低い。その渦励振振動最大振幅は照明灯部で、0.7～0.8Gである。
- (2) 1灯用照明柱の面外2次固有振動($f = 7.5\text{Hz}$)が風により励起され、その照明灯部の最大振動振幅は2.5G近くに達して、1次振動と共に制振装置による対策が必要である。
- (3) 現地計測期間が冬期であるので、計測された風向データは西から北方向が主である。照明柱に発生した大きな渦励振振動は1灯用・2灯用共に北風による面外振動である。
- (4) 減衰付加型である円板鋼球型制振装置は、動吸振器型である張力弦型制振装置と同程度の大きい制振効果を(付加減衰 $\Delta\delta = 0.02$)与えることはばね支持実験で推定できた。
- (5) 円板鋼球型制振装置を照明柱に上端部・中間部に取り付けることにより、風による渦励振振動の最大振幅は1灯柱で1/5～1/7、2灯柱で1/3に低減され、本制振装置の制振効果が大きいことが確認できた。

最後に、本装置開発に当り種々の有効なご助言頂いた関西国際空港(株)新井課長、現地実験実施に際して多大なご協力頂いた(株)きんでん則岡課長、さらに、本研究開発遂行期間中終始ご助力頂いた那須電機鉄工(株)大阪工場田中部長、(株)ニチゾウテック 工学博士 牛尾取締役本部長及び関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田・飯田・和泉・多田：照明柱の風による振動とチェーンダンパーの制振効果(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(S.63.10)
- 2) 和泉・山田・渡辺：照明柱の風による振動とチェーンダンパーの制振効果(その2 実大振動実験)、土木学会第43回年次学術講演会(S.63.10)

- 3) 城・金子・永津・高橋・木村：耐風照明柱の開発、川崎製鉄技報、Vol. 20、No. 4 (1988)
- 4) 稲田・烏野・堤・城：衝撃ダンパーによる照明柱の制振効果、土木学会第44回年次学術講演会 (H. 1.)
- 5) 関西国際空港(株)：空港連絡橋道路照明工事(その3) 特記仕様書 (H. 3. 2)
- 6) 松浦・松本・水内・有馬・城市：動吸振器による振動防止法に関する研究(機械式動吸振器の場合)、関西造船協会誌、第197号 (S. 60)
- 7) 大久保信行：機械のモーダルアナリシス、中央大学出版部 (S. 59)
- 8) 本庄・森北・有馬・南條・小林：照明柱用装置の開発、土木学会第47回年次学術講演会 (H. 4. 9)

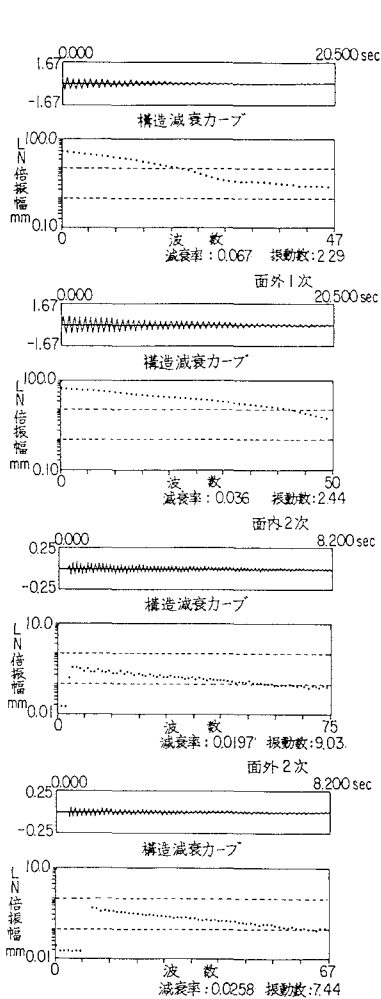


図. 12 1灯柱減衰率測定結果
(制振装置取付後)

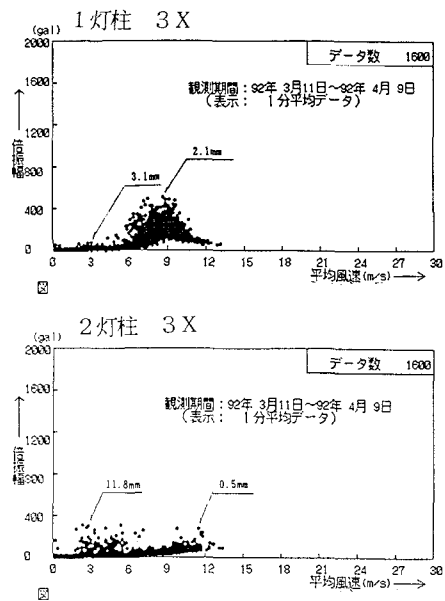


図. 13 風向と振動振幅
(制振装置取付後)

表. 7 付加減衰率の実測値と推定値

照明柱 型式	振動種類	等価振動重量 (Kgf)	取付位置* (mm)	付加減衰率		
				$\Delta \delta_s$	$\Delta \delta_p$	
1灯柱	面内	1次	170	650	0.040	0.043
		2次	198	4000	0.028	0.002
	面外	1次	193	650	0.036	0.021
		2次	448	650	0.014	0.015
2灯柱	面内	1次	207	650	0.033	0.017
		2次	209	4000	0.026	0.019
	面外	1次	211	650	0.033	0.023
		2次	245	4000	0.022	0.015
備 考		* 照明柱の上端部からの距離				

(1992年9月21日受付)