

Design of Highway Light Pole with Resistance to Wind Vortex-Induced Oscillation



城 郁夫
Ikuo Jo

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(課長)



烏野 清
Kiyoshi Uno

九州大学 工学部土木
工学科 助教授・工博



永津 省吾
Shogo Nagatsu

エンジニアリング事業
部 建材技術部



金子 忠男
Tadao Kaneko

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
構造研究室 室長(部
長補)・工博



植木 八寿彦
Yasuhiko Ueki

エンジニアリング事業
部 建材技術部長



高橋 千代丸
Chiyomaru Takahashi

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(部長)

要旨

連続的な風で生ずるカルマン渦による照明柱の渦励振振動は照明柱の形状、寸法により強く影響を受ける。実大照明柱の風洞実験の結果は、八角形断面の無次元倍振幅は円形断面より大きなものとなる。また、鋼球式衝撃減衰路の制振効果に大きく影響を及ぼす鋼球の遊間距離と装置取付部の照明柱の変位との相関関係を調べ、同期という見地からその機構の解明を図った。この結果制振解析プログラムを開発し、照明柱の耐風設計手法を確立することができた。本設計に基づく耐風照明柱は、首都高速道路公団にて確認実験を実施の上横浜ベイブリッジに採用された。

Synopsis:

The Karman-vortex oscillation behavior of light poles vibrated by steady wind is greatly affected by size and shape of cross-section of poles. As a result of wind tunnel tests with full-scale models, nondimensionalized double displacement amplitude of octagonal cross-section pole was greater than that of round cross-section pole.

Study on the relationship between the clearance of the steel balls in an impact damper and the displacement amplitude at the section where the damping device is to be installed, were made in terms of sympathetic vibration. The results clarified the mechanism of the relationship which greatly affects damping efficiency. And the design technique of anti-wind vortex oscillation pole can be established after the development of the oscillation analysis program.

Anti-wind vortex oscillation light poles based on the design technique were adopted for the Yokohama Bay Bridge after a confirmation test by Metropolitan Expressway Public Corporation.

1 まえがき

前報¹⁾の耐風照明柱の開発では、風によって引き起こされる照明柱の渦励振振動の低減方法について、著者らが開発した鋼球式衝撃減衰器の概要ならびに制振効果を振動実験、風洞実験での諸資料をもとに解析し、報告した。本研究では照明柱をどのような断面形状、断面寸法に設計するのが耐風的であるかを風洞実験から得た知見をふまえて記述する。また報告の後半では、鋼球式衝撃減衰器の制振効果に大きく影響を及ぼす鋼球の同期現象を減衰器の模型での振動実験から、各パラメータ間の相関を解明した。

2 渦励振

道路照明の設置の目的は路面を所定の明るさに照らし、通行者の安全を保つことである。照明柱はその照明用灯具の空間的位置を保

持でき、電気上の諸仕様をみだし、かつ交通に支障がなければ機能上どのようなものでもよいことになるが、現実にはその安定性、統一性、経済性とある程度の美観から、いくつかの標準タイプが定められている。また、最近のリゾート開発、都市再開発等の気運が高まる中、設置箇所の景観に合う、あるいは景観をより引き立たせる照明施設が望まれるようになり、照明柱にもさまざまなデザインが研究されるようになってきた。

道路関係では、特に橋梁部においてその傾向が顕著である。一方高速道路をはじめとし、道路は河川、港湾、海峡、峡谷等の風環境の厳しい場所に建設されることが多い。このことは照明施設についても、一般的安定性、経済性の他に、デザインと耐風性との関係の研究が重要であることを意味している。

一般的に、にぶい断面を一樣な流速の定常流の中に置くと、その周囲、後流に複雑な流れの状態が観察される。物体が流線形でないかぎり、物体周囲の流線の形状は定常的でない。Fig. 1は円柱の場合の異なる二つの時刻における流線を図化したものである。こう

* 平成元年12月21日原稿受付

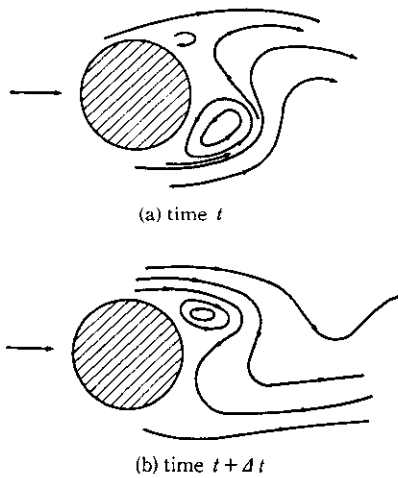


Fig. 1 Transformation of shape of streamline behind a round column



Fig. 2 State of vortices behind a round column

した形状は、にぶい断面いずれの場合も典型的に現れるが、後流の形状が時々刻々変化する姿を示している。Fig. 1 (a) では、一つの渦が後流下方に十分発達し、上方にも他の渦が生成しかかっている状態を示し、Fig. 1 (b) では、上側の渦が発育するのに対し、下方の渦がこわれて下流へ運ばれた状況を示している。このように渦が交互に形成され、離脱し流体中に放出された姿を模式的に描くと、Fig. 2 のように規則的な渦の配置が見られる。規則的な渦の放出はにぶい断面を持つ二次元柱の背後の流れの特徴であり、ほとんどのレイノルズ数でおこる。渦が断面柱から離脱し、流体中に放出されることにより、流れを横切る方向にも力、揚力が周期的に働く。これは渦が運び去られるごとに、物体周囲の循環の方向が変化し、これによって流れと直角方向に交互に揚力が生まれることになる²⁾。

構造物の流れに直角方向の固有振動数が風による渦の周波数と一致する風速付近で、構造物は流れに直角方向の振動を励起される。渦の発生周波数が構造物の固有振動数に引き込まれるいわゆる同期現象である。この渦の発生周波数は構造物の断面形状とレイノルズ数に固有なストローハル数 S_i により定まる。それらの関係を次式に示す。

$$S_i = ND/V \dots \dots \dots (1)$$

- N: 渦の発生周波数
- D: 部材断面代表寸法
- V: 共振風速

煙突や橋梁の主塔、ブラントのタワー等の円形断面、もしくは比較的ずんぐりした角形断面を有する構造物には、しばしばこの渦励振現象がみられ、疲労破損や機能障害をきたすことがある³⁾。

以下に、照明柱にもこのような渦励振現象がみられるかの確認と、この現象が生じた場合、どのような断面形状、断面代表寸法にするのが渦励振対策上好ましいのか、風洞実験結果を示して、解析、説明する。

3 照明柱の断面形状と渦励振

3.1 風洞実験

照明柱の断面形状ならびに断面寸法が渦励振による照明柱の最大振幅、振動加速度他にどのような影響を及ぼすか、風洞実験にて確認した。

3.1.1 使用風洞

風洞は三菱重工株式会社長崎造船所の大型汎用風洞を使用した。本風洞は風速 1~25 m/s の範囲で任意の風速に設定可能であり、一様流を発生させることができる。今回も最大風速 25 m/s までの試験を実施した。測定部の風洞の断面は、高さ 10 m × 幅 3 m または高さ 3 m × 幅 10 m として使用することができる。さらに測定部は密閉型、開放型のいずれにも可能で、今回は縦型 (高さ 10 m × 幅 3 m) の開放型測定部にて使用した。

3.1.2 試験用照明柱の断面諸元

風による渦励振現象が照明柱の断面形状、断面寸法の違いによってどのように異なるか、八角形断面、円形断面を有した高さ 8 m の 2 本の実大照明柱を用いて風洞実験を行った。Fig. 3 (a), (b) に試験用照明柱の断面諸寸法を示す。

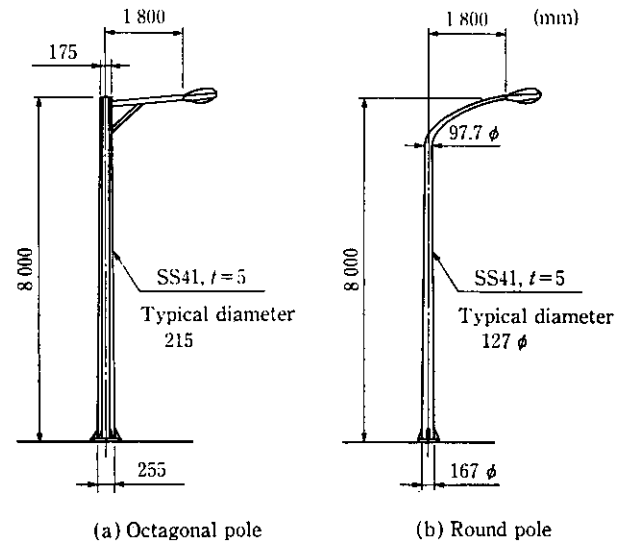


Fig. 3 Shape and size of test poles

3.1.3 試験方法と計測項目

試験用照明柱を風路床面に設置された架台の上に基部を固定して支持した。この基部の固定方法は種々の計測値に影響を及ぼすので重要である。試験では一様流を吹かせ、風速と照明柱の振動振幅、振動加速度を計測した。また、最大振幅の発生する風速において、試験用照明柱を外部より強制的に拘束し、その後拘束を解除してから定常振動に至るまでの振動の発達時間を計測した。

3.1.4 計測結果

八角形断面照明柱 (八角柱) と円形断面照明柱 (円形柱) の各種計測結果について述べる。まず八角柱では、面内方向風速 25 m/s までの間に、面外 1 次振動が約 4 m/s、面外 2 次振動が約 9 m/s の風速時に、渦励振と思われる限定振動が生じた。また面外 3 次振動は、風速 25 m/s 付近で出始めており、振動振幅がピークとなる風速は、25 m/s 以上にあると思われる。ただし、実際の照明柱が機能障害や疲労破損を起こす対象風速は、かなり頻繁に吹く風で、風速 20 m/s

Table 1 Results of wind tunnel test (Octagonal pole)

Measured items	Oscillation mode	
	Out-of-plane 1st mode	Out-of-plane 2nd mode
Frequency f (Hz)	2.82	7.13
Velocity in resonant state V (m/s)	3.8	9.0
Strouhal number S_i	0.16	0.17
Displacement amplitude at top of pole (mm)	22.7	5.7
Acceleration amplitude at top of pole (cm/s ²)	697	1 013

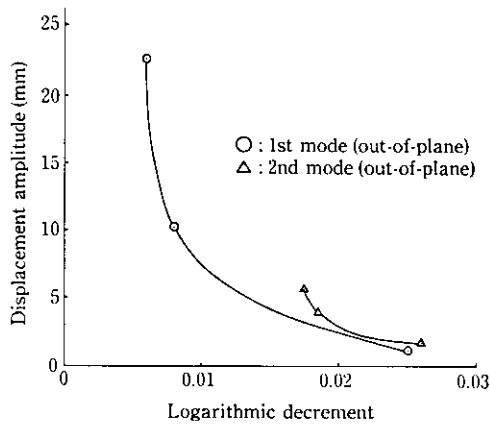


Fig. 4 Effect of logarithmic decrement on the displacement amplitude of the top of the octagonal pole at resonant state

程度が上限値と考えられる。したがって、八角柱の3次振動については検討の対象外とした。各振動モードが発生すると風速、振動振幅、加速度、ストローハル数等の試験結果概要を Table 1 に示す。

Table 1 からわかるように限定振動が発生した時のストローハル数は 0.16~0.17 で、八角断面の支柱から発生するカルマン渦による振動と思われる。限定振動が発生した面外1次および2次振動について、構造減衰を変えて試験を実施した結果を Fig. 4 に示す。構造減衰と振幅の関係からわかるように、構造減衰が 0.02 以上になると振幅はかなり小さくなる。また1次モードの振動は、わずかな構造減衰の増大によりかなり小さくなる。面外1次および2次振動モードにおける共振風速時の振動の発達状況、すなわち過渡応答状態を Fig. 5 に示す。

面外1次振動では、振動の発達終了までの時間が 277 s とゆっくりとした発達状況であるのに対し、面外2次振動では 22.4 s とかなり早く発達する。

次に円形柱について述べる。面外1次振動は、発生が予想される風速が約 1 m/s と小さく、今回の試験では確認できなかった。面外2次振動が風速約 4 m/s で、面外3次振動が風速約 10 m/s で、渦振動と思われる限定振動が発生した。また風速約 18 m/s 付近で、ランプにかなり大きい加速度が発生した。この時、試験柱の頂部は振幅、加速度ともにさほど大きな値を示さなかった。4次モードの振動と考えられる。

各振動が発生する風速とその時の振動振幅、加速度およびストローハル数等試験結果概要を Table 2 に示す。発生する振動振幅は、八角柱に比して小さな値であった。また、振動が発生した場合のストローハル数は、0.18 程度がほぼ円柱のストローハル数と同じ値

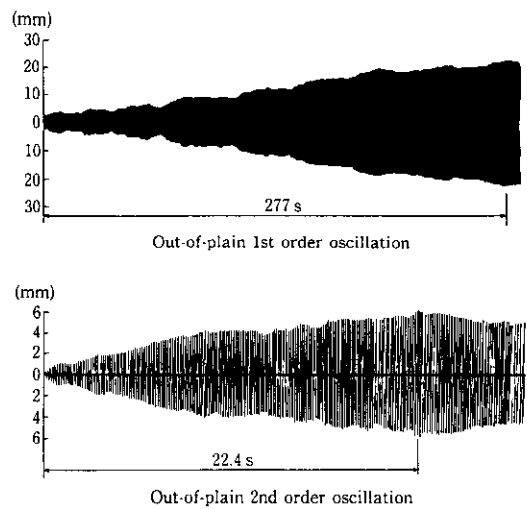


Fig. 5 Shape of response waves in resonant state (octagonal pole)

Table 2 Results of wind tunnel test (round pole)

Measured items	Oscillation mode		
	Out-of-plane 2nd mode	Out-of-plane 3rd mode	Out-of-plane 4th mode
Frequency f (Hz)	5.58	13.55	29
Velocity in resonant state V (m/s)	4.0	9.8	17.8
Strouhal number S_i	0.18	0.18	0.20
Displacement amplitude at top of pole (mm)	0.7	0.7	0.04
Acceleration amplitude at top of pole (cm/s ²)	82	550	190

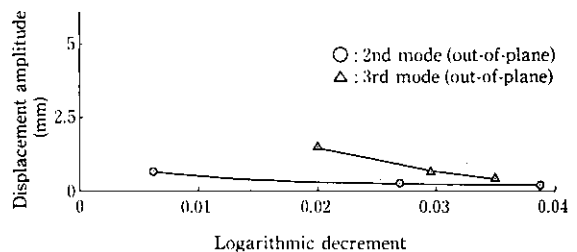


Fig. 6 Effect of logarithmic decrement on the displacement amplitude of the top of the round pole at resonant state

であり、カルマン渦による振動と思われる。

振動振幅と構造減衰の関係を調べるために、限定振動が発生した面外2次、3次の振動モードについて、構造減衰を変えてポール頂部の変位を観測した。その結果を Fig. 6 に示す。対数減衰率が 0.03 以上になると振動はほとんど発生しなくなる。

面外2次、3次の振動モードにおける共振風速時の振動の発達状況すなわち過渡応答状況を Fig. 7 に示す。2次振動が約 25 s、3次振動が 10 s 程度ではほぼ最大振幅に達する。

3.2 試験結果に関する考察

風洞実験により八角柱と円形柱の耐風性状の違いが明らかになった。八角柱と円形柱の耐風性を比較すると全般的に円形断面の方が揺れにくい。本結果をさらに定量的に評価するため、次式で与えら

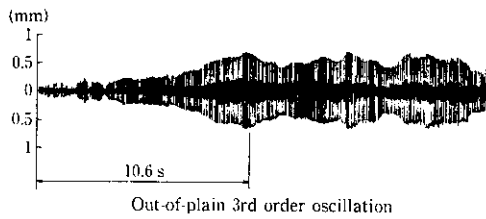
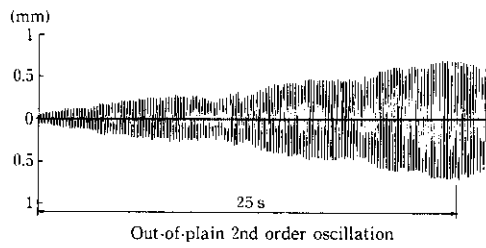


Fig. 7 Shape of response waves in resonant state (round pole)

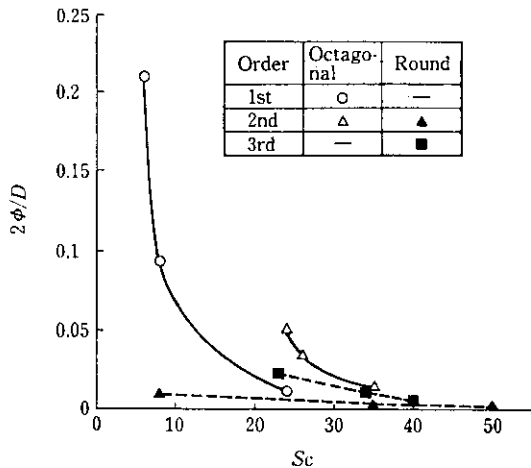


Fig. 8 Relation between Scruton number S_c and nondimensionalized double displacement amplitude $2\phi/D$

れるスクルーション数を横軸に、渦励振振動の無次元倍振幅を縦軸にとり、両試験柱の結果を重ねて示すと Fig. 8 となる。

$$S_c = 2M\delta_s/\rho D^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$M = \frac{\int m(x)[\phi(x)]^2 dx}{\int [\phi(x)]^2 dx} \dots\dots\dots (3)$$

- S_c : スクルーション数
- M : 正規化等価質量
- δ_s : 対数減衰率
- ρ : 空気密度
- D : 代表寸法
- $m(x)$: 質量分布
- $\phi(x)$: 振動モード

Fig. 8 からわかるように、同じスクルーション数の場合、八角柱の方が円形柱より大きい渦励振振動が発生することを明確に示している。

空気力学的には照明柱の渦励振振動は支柱部の影響が支配的であり、灯具等の影響はほとんどなく、構造的に質量を増大させることのみ効果があったと考えられる。

Table 3 Effect of cross-section of the pole on oscillation

Shape of cross-section	Scruton number	Nondimensionalized double displacement $2\phi/D$	Maximum displacement amplitude (mm)
Octagonal (1st order)	10	0.07	7.5
Round (2nd order)	13	0.008	0.51

Table 4 Influence of damper on Scruton number

Type of pole	Oscillation mode	Scruton number S_c	
		Without damper	With damper
Octagonal pole	Out-of-plane 1st mode	4	59
	Out-of-plane 2nd mode	14	54
Round pole	Out-of-plane 2nd mode	13	65
	Out-of-plane 3rd mode	23	80

今回、実験に用いた八角柱、円形柱の構造減衰を対数減衰率で 0.01 とした場合、八角、円形柱が渦励振現象をおこしたなかで振幅の最も大きなモードを対象に、スクルーション数、無次元倍振幅、最大振幅を Table 3 に示す。これからも円形断面の方が空力的には明らかに有利であることがわかる。

照明柱を耐風的にデザインする場合、以下の点に配慮することが望ましい。

- (1) 支柱部をできる限り、円形断面にすること
- (2) 支柱部の断面寸法を、設計対象最大風速の静荷重換算外力に耐えうる範囲で小さくすること

支柱部の風の静荷重換算外力に耐えうる範囲で断面寸法を小さくすることは、スクルーション数を大きくすることになり、照明柱の振動振幅、振動加速度を小さく抑ええることができる。デザインの都合上、支柱部が八角形から四角形の角形断面になる場合、断面寸法には一層注意せねばならない。

試験からわかるように最大変位量を小さくおさえて、風に対する安定性を十分に保つには、八角形、円形断面のスクルーション数をそれぞれに見合うところまで大きくすればよい。この数値をダンパーを用いずに試験柱本体で満たすには断面の肉厚をほぼ 2 倍にする等の対策が必要である。これに対して著者らが開発した鋼球式衝撃減衰器を用いれば Table 4 となり、スクルーション数の目標値を越え、十分な制振対策等となる。制振効果に大きく影響する制振装置の設計パラメータ等については追加研究を行っているので次章にて記述する。

4 制振装置のパラメータと特性

4.1 鋼球を用いた衝撃減衰器

制振装置としてよく知られるものに鍾りの位相差や、ばね・鍾り系の振動を用いた動的吸振器があり、一般に広く用いられている。制振の対象となる構造物(主振動系)と減衰装置(副振動系)の固有振動数を近づけることにより、理論的には主振動系の応答を大幅に減ずることができる。しかし、動的吸振器は起振力の振動数が限られた範囲内にある場合は有効であるが、カルマン渦により振動する照明柱のように、振動数の範囲が大きなものに対しては不十分で

あり。

一方、物体の衝突時のエネルギー損失を利用した衝撃減衰器についても、飛行機翼や工作機械を対象にこれまでに研究がなされている。このタイプの制振装置については、構造物に1サイクルの外力が作用する間に等しい時間間隔で、制振子が制振装置容器の左右の壁に1度ずつ衝突する場合、すなわち周期運動がみられる場合に最も効果があるとされている⁶⁾。したがって、同期運動が起こるように設計することが必要条件となるが、構造物に作用する加振力の振動数範囲をある程度広くとることができる。また最近では、大型の塔構造物に水のスロッシングを利用した制振装置が設置され、風による振動の低減に用いられている^{6),7)}。

照明柱の制振装置としては起振力の振動数範囲を考慮し、新たに衝撃減衰器を考案し、適用した。照明柱の美観を損なわないように内部の細長い空間に装着するという制約条件から、縦長の容器に階層状の制振室を設け、各室内に適当な質量の制振子を封入した構造とした。照明柱の振動に同調しながら、制振子の衝突により起振外力を打ち消すように工夫した。制振子としては鋼球を用いた。制振子の衝撃力により振動エネルギーを弱めるには、与えられた設計条件下で最大の衝撃力が得られるようにする必要がある。衝撃減衰器の設計にあたっては、制振子の質量、制振子が運動すべき間隔(遊間)および制振子と容器との反発係数等を総合的に考慮せねばならない。なお、これまでの研究では、制振子が構造物の振動と同調して安定な運動をする時、①遊間が大きいほど制振効果が高い、②遊間一定の条件下では構造物に対する制振子の質量比が大きいほど制振効果が高い、および③制振子が衝突する面の反発係数が大きいほど制振効果が高い等の知見が得られている。

4.2 制振装置の設計パラメータ

制振子として用いた鋼球と制振装置容器との遊間が衝撃力に及ぼす影響を調査するため、Fig. 9に示すような装置を用いて数種の振動数のもとで衝撃力を求めた。振動数7.2および19.9 Hzにおける衝撃力の測定結果と、遊間を入力変位で割ったパラメータ C/ϕ との関係を図10に示す。この図より C/ϕ の値がほぼ2以下で同期運動が生じていることがわかる。また入力加速度が大きくなるにつれて C/ϕ の値が2以上でも同期運動する傾向が見られる。

以上の結果より、 C/ϕ と入力振動の大きさとの関係を詳しく調べるために振動実験を実施した。また実際の照明柱に装着される制振装置の内側には、防音用の樹脂塗装が施されていることから、反発係数が鉄-鉄の場合と異なっていると思われるため、反発係数による違いを調べるための試験も併せて実施した。

Fig. 11は入力加速度とパラメータ C/ϕ の関係をまとめて示したものである。これはまず遊間、次いで入力振動数を一定に保ち、入力加速度を徐々に大きくした時に、同期運動を始める限界の入力速度を求めたものである。遊間は1~7 mm までを1 mm 間隔で、入力振動数は3.5~30 Hz、入力加速度は100~1500 galの範囲で実験を行った。

図より、入力加速度が大きくなるにつれて、遊間および入力振動数に無関係に同期運動を始める C/ϕ の値が得られることになる。したがって、入力加速度のみで同期領域の限界である遊間 C を求めることができることから、照明柱の制振装置の設計において有効な図であるといえる。入力加速度 ϕ とパラメータ C/ϕ の関数を最小自乗法を用いて近似し、図中に併記した。設計の簡便化を図り、折線により近似した。両者の関係は、

$$\left. \begin{aligned} C/\phi &= 0.0038\phi + 1.7 & (100 \leq \phi \leq 700) \\ C/\phi &= 4.4 & (\phi > 700) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

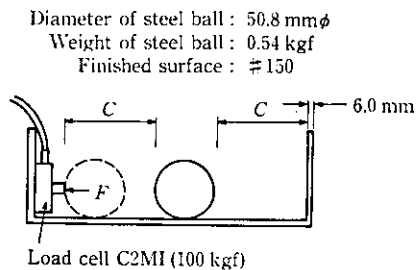


Fig. 9 Basic experiment set up for movement of steel ball and measurement of impact force

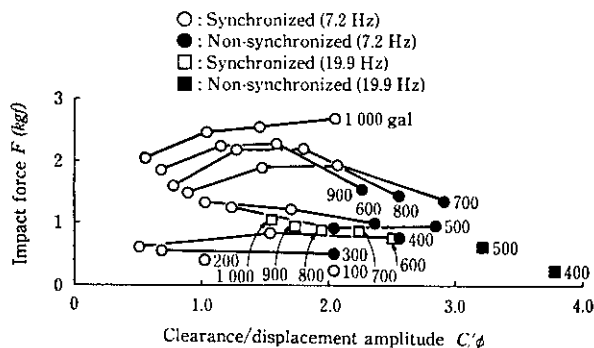


Fig. 10 Relation between nondimensionalized clearance and impact force

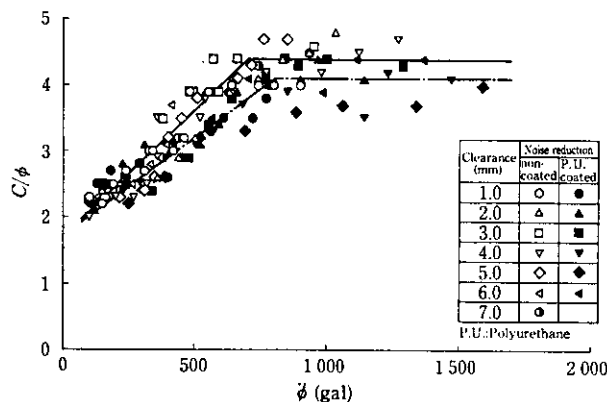


Fig. 11 Inter-relations between acceleration amplitude ϕ and clearance divided by displacement amplitude C/ϕ

で表すことができる。最大衝撃力の得られる遊間 C は同期領域の限界である遊間より多少小さいところに存在することを考慮し、式(4)より複数の次数に対して有効な遊間を設計することができる。

具体的には、まず照明柱の各次数の固有振動数に対応するカルマン渦励振時の応答加速度振幅を求める。次に、各次数の目標と定める応答加速度、振幅に対応する限界の遊間を式(4)より求め、その中で最も小さい遊間を実用上最適遊間と考えてよい。

制振装置の内部に防音用の樹脂塗装を施した場合について同様に調べた入力加速度とパラメータ C/ϕ の関係を Fig. 11 に併記した。樹脂塗装がない場合と比較してみると、樹脂膜により反発係数が小さくなり、同期運動し始める C/ϕ の限界値は少し小さくなってい

る。反発係数が小さいと衝突後の速度が小さくなるため、より大きい入力速度でないと同期運動しないことを示している。入力速度 ϕ とパラメータ C/ϕ の関係を直線近似したものを式(5)に示す。

$$\left. \begin{aligned} C/\phi &= 0.0030\phi + 1.7 & (100 \leq \phi \leq 800) \\ C/\phi &= 4.1 & (\phi > 800) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

樹脂塗装のない場合の式(4)と比較すると、ある変位、加速度に対して決まる遊間は若干小さくなるが、その差は比較的小さい。

4.3 設計パラメータが制振効果に与える影響³⁾

制振装置の設計パラメータと制振効果の関係を数値計算により検討した。まず風による照明柱の応答解析、次いで制振装置を取り付けた場合の応答解析を行った。

4.3.1 振動応答解析

渦励振による照明柱の振動を風の強制外力によるものとして応答解析を行った。八角形断面照明柱を多質点系モデルに置き換え、まず固有値解析により固有振動数および振動モードを求めた。固有振動数はあらかじめ風洞実験時に測定されたものとよく一致した。

次に、風による強制外力が作用した場合の応答解析を行った。この解析にあたっては、変位モードは固有値解析結果を用い、固有振動数、共振風速、対数減衰率および各次数に対する揚力係数は風洞実験結果を用いた。

4.3.2 制振装置の衝撃力と照明柱の応答

制振装置の設計パラメータである制振子の重量、遊間、反発係数を変化させ、それらのパラメータが衝撃力を通して照明柱の応答値に及ぼす影響を調べた。

固有値解析で得られた変位モードにおいて振幅の大きい部位に制振装置を設置するものとし、風による応答解析の結果得られた制振装置取付位置の応答を制振装置に対する入力とした。制振装置の諸元は、遊間 4.6 mm、鋼球径 50.8 mm ϕ とし、先に行った風洞実験と同じものとした。また、衝撃力は実験より得られた衝撃力作用時間の間一定と仮定した。

制振装置設置時の照明柱の最大応答値を Table 5 に示す。実測値と解析値はよく一致しており、応答解析により制振装置の効果を十分シミュレートしうることがわかる。

次に、設計パラメータを変化させて同様に解析を行い、制振効果に対する影響を検討した。制振装置の効果を示す制振効率⁴⁾は、制振装置装着により低減された応答を制振装置を取り付けない場合の応答で除することにより計算される。設計パラメータは、前述したように、鋼球と容器壁との遊間、鋼球重量(鋼球数)、反発係数の三つとした。

(1) 遊間の影響

鋼球数、反発係数一定のもとで 1~4 mm の遊間に対して応答解析を行った。面外 2 次モードに対する結果を Table 6 にまとめて示す。衝撃力は限界の遊間範囲内では、遊間が大きいほど大きいが、逆に遊間が小さいほど早く制振装置として機能し、振動の発達を妨げるため制振効率は大きくなっている。

(2) 鋼球重量(鋼球数)の影響

遊間、反発係数を一定とし、鋼球の個数を 2~12 個として応答解析を行った結果、Fig. 12 に示すような結果を得た。鋼球数の増加につれ、制振効果が大きく、衝突後の応答が低減されることがわかる。しかし、変化の割合が比較的小さいことから、通常 2~4 個の鋼球を用いれば十分と考えられる。

(3) 反発係数の影響

鋼球数、遊間を一定にして、反発係数を 0.1~0.5 の範囲で変化させて応答を求めた。結果の一例をまとめて Table 7 に示

Table 5 Comparison between experimental and analysed response of octagonal pole oscillation

Oscillation mode	Out-of-plane 1st mode		Out-of-plane 2nd mode	
	Experimental	Analysed	Experimental	Analysed
Displacement amplitude (mm)	0.16	0.21	0.11	0.10
Acceleration amplitude (cm/s ²)	49	67	210	199

Table 6 Influence of clearance on effect of the damper

Clearance C (mm)	Displacement amplitude (cm)	Acceleration amplitude (cm/s ²)	Effect of the damper	Time to start collision
1	0.07	150	0.90	2.7
2	0.12	240	0.83	6.0
2.3	0.13	270	0.82	7.1
3	0.16	325	0.78	10.2
4	0.20	440	0.72	16.4

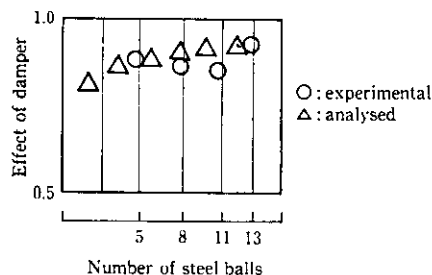


Fig. 12 Influence of number of steel balls on effect of damper

Table 7 Influence of rebound coefficient and initial place of steel ball in damper on effect of the damper

Rebound coefficient e	Maximum response displacement amplitude (mm)	Effect of the damper
0.1	0.20	0.72
0.2	0.16	0.77
0.3	0.13	0.82
0.4	0.10	0.86
0.5	0.08	0.89

す。反発係数が大きいほど制振効果が大きく、既応の研究結果と一致している。しかし、反発係数による制振効果の違いは比較的小さい。防音対策上、制振装置内部に樹脂を塗布することにより反発係数は若干低下するが、制振効果への影響は小さい。

4.4 設計パラメータについてのまとめ

以上の実験、解析をとおして明らかになったことをまとめて記す。

- (1) 制振装置が有効に作用するための必要条件である同期運動は、制振装置取付位置の変位に対する遊間の比が約 2 以下の時

に無条件に見られるが、加速度が大きくなるにつれて、2以上でも同期運動する傾向がある。

- (2) 同期運動するために必要な遊間の大きさは、制振装置取付位置の変位ならびに加速度より式(4)または(5)により求められる。
- (3) 最適遊間は、照明柱の各次数の制振装置取付位置の変位、加速度に対する限界の遊間値のうち最小のものを求めることにより得られる。
- (4) 照明柱と制振装置との一体解析により、制振装置の効果を解析的に求めることができる。
- (5) 制振装置の遊間が大きいほど衝撃力は大きい、逆に小さいほど早く制振装置として機能し始める。
- (6) 鋼球重量が大きいほど制振効果は大きい、通常は2~4個の鋼球で十分な制振効果が得られる。
- (7) 反発係数が大きいほど制振効果は大きい、制振装置内部に防音用の樹脂を塗布し反発係数が減少しても十分な制振効果がある。

5 耐風照明柱の設計例

首都高速道路公団では、1989年9月に開通した首都高速道路の横浜ベイブリッジに耐風照明柱を建柱した。横浜ベイブリッジは横

浜港口部の航路を大黒埠頭から本牧埠頭に向けて横断する全長860mの斜長橋であり、新しい横浜港のシンボルとしての役割をも果たしている。照明柱は、Photo 1に示すような、橋梁の美観に調和した直線を基調としたデザインが採用された。建柱場所は強風域であるため、耐風対策を考慮して照明柱の設計がなされた。

照明用ポール強度計算基準(日本照明器具工業会)にしたがい、60 m/sの風速に対して十分な強度を有するように静的設計が行われた。その際、照明機能との関係、デザインへの対応、橋梁上の照明柱架台に作用する外力の低減、およびカルマン渦励振時の振動振幅の最小化等を総合的に考慮し、円形小径断面ならびに短いアームを採用した構造となった。

カルマン渦励振による振動振幅をさらに低減させるため、鋼球を用いた制振装置が照明柱内部に装着された。照明柱の固有解析の結果得られた面内外1~3次の振動モードを考慮して、制振装置の取付高さは11.4 mとなった。鋼球の個数は2個とし、応答解析の結果得られた各モードの振動振幅より遊間が決定された。

実大照明柱による振動実験、模型照明柱による風洞実験の結果、鋼球を用いた制振装置により良好な制振効果が得られることが確認された⁹⁾。

また、制振装置の効果をさらに高めるために、アーム先端と灯具取付部の強化およびランプと灯具本体の取付強化があわせて実施された。

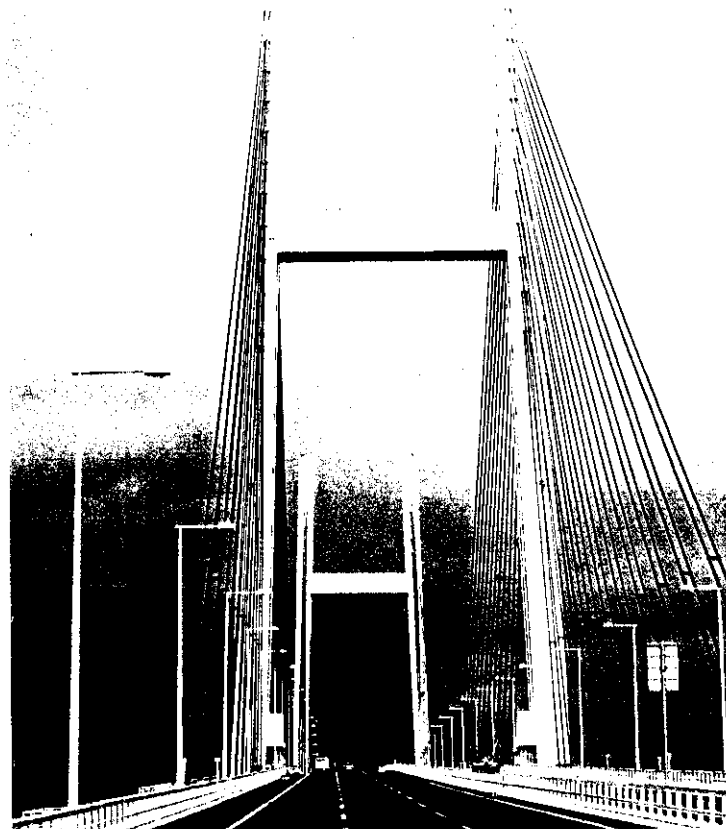


Photo 1 Light poles on Yokohama Bay Bridge

6 まとめ

本研究で解明もしくは確認された事項を以下に述べる。

- (1) 実験用 8 m 実大照明施設は、その柱の断面形状が八角、円形どちらの場合にも、渦励振現象が生じる。このことより、他の一般的照明施設にも同現象が生じることが推定できる。
- (2) 空気力学的には、照明施設は照明鉛直支柱部の断面形状、断面寸法の影響が支配的である。
- (3) 耐風工学的に、照明柱の鉛直支柱部の断面形状は円形もしくは八角形に近い形状がよく、実験用 8 m 実大照明柱の場合、八角形断面の無次元倍振幅は構造減衰を対数減衰率で 0.01 としたとき、振動モードは異なるが、円形断面の約 8 ~ 9 倍となった。
- (4) 鉛直支柱部を八角形~四角形にする場合は、断面寸法を風による静荷重換算外力に耐えうるに必要な寸法以上にすることはさけた方がよい。
- (5) やむをえず照明柱が大きな振動振幅、振動加速度を引き起こす場合は制振ダンパーを用いるのが望ましい。
- (6) 鋼球の衝撃力を用いた制振ダンパーである鋼球式衝撃減衰器は、制振効果に大きく影響する鋼球と照明柱振動との同期現象に関する設計パラメータが解明され、どのような断面の照明柱に対しても対応できる。
- (7) 渦励振振動ならびにその制振に関する解析プログラムを作成し、それによる解析結果と風洞実験値とを比較したところ、よく一致した。したがって、当プログラムはその他いろいろな照明柱の概略耐風設計に用いることが可能と考えられる。

- (8) 照明柱の渦励振振動を論ずる場合、アームと灯具、支柱と基礎（あるいは橋梁の桁）との結合条件は非常に重要で、ダンパー等を用いて制振効果を期待する場合、特に注意を要する。

照明施設の渦励振対策は、すでに日本の主要な橋梁等で実施されつつある。照明施設の耐風設計に際して重要なことは照明柱をいかに耐風工学的に望ましいプロポジション、断面形状、断面寸法に近づけ得るかである。照明施設は、その本来の機能はもちろん、美観、安定性、耐久性、経済性を満たしつつ、揺れの少ないものにせねばならない。しかしながら、それが設置される場所によっては、まわりの景観、構造との関係上、必ずしも耐風工学的に好ましいプロポジション、断面形状、断面寸法にできず、渦励振振動の振幅、加速度が限度を越える場合が生じる。このような時に、制振ダンパーを設置して、振動を低減することが望ましい。すなわち、照明施設の風対策の第 1 ステップは、揺れにくい照明柱のデザイン設計であり、第 2 ステップが制振ダンパーを用いて振動を低減する方法である。

今回、実施例として記述した首都高速道路公団の横浜ベイブリッジの照明施設は、石井幹子照明デザイン事務所のデザインであるが、照明柱に関しては、耐風工学的にも十分配慮されたデザインとなっている。渦励振振動を全般的に小さくおさえると同時に、一部、十分に押さえ切れない振動モードに対しては鋼球式衝撃減衰器にて制振対策がほどこされている。今後とも風対策をほどこした照明施設は増加するものと思われる。

最後に、耐風照明柱の検討に際して、ご指導いただいた首都高速道路公団神奈川建設局施設工事事務所の東田副所長に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 城 郁夫, 金子忠男, 永津省吾, 高橋千代丸, 木村正夫: 「耐風照明柱の開発」, 川崎製鉄技報, 20 (1988) 4, 58-64
- 2) 岡内 功, 伊藤 學, 宮田利雄: 「耐風構造」, (1977), 150-156, [丸善]
- 3) 伊藤 學: 「風による建造物の振動」, 土木学会論文集, (1985) 362, 13-23
- 4) 西岡邦夫, 西村誠一, 浜端 進, 平川賢爾, 坂本 傑: 「照明灯の制振装置」, 住友金属, 16 (1964) 1, 44-53
- 5) 山田 元: 「断片線形系に対する衝撃ダンパの制振効果」, 日本機械学会論文集, 39 (1973) 322, 1833-1845
- 6) 立見栄司, 野路利幸, 吉田英敏, 小坂英之: 「スロッシングを利用した制振装置の研究 (その 3) 高層タワーへの適用とその振動実験」, 土木学会第 43 回年次学術講演会, (1988), I-313
- 7) 藤井邦雄, 佐藤孝典, 大築民夫: 「液体のスロッシングを利用した制振装置—Tuned Sloshing Damper について—」, 日本建築学会大会, (1987) 2742
- 8) 稲田雅裕, 烏野 清, 堤 一, 城 郁夫: 「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, (1989) I-350
- 9) 和田克哉, 恵谷舜吾, 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, 23 (1989) 8, 43-48