

Development of Highway Lighting Pole with Resistance to Wind Vortex-Induced Oscillations

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)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
建材研究室 主任研究
員(課長)・工博永津 省吾
Shogo Nagatsuエンジニアリング事業
部 建材技術部高橋 千代丸
Chiyomaru Takahashiエンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(部長補)木村 正夫
Masao Kimuraエンジニアリング事業
部 企画調整部 事業推
進室 主査(課長)

1 緒 言

道路用照明柱は一般道路はもちろん美しい曲線を描きながら都市内にめぐらされた高速道路に配置され、安全走行のための路面を照らす機能を全うするとともに、道路に不可欠の設備として美的要素を付加する役割をも果たしている。このため色彩とともに、形状的に種々の美観上の配慮をした設計がなされているが、この傾向は最近ますます加速されている。とくに都市内ではアメニティ空間の増大が叫ばれ、人々の集まる駅前広場や公園などでは照明柱はストリートファニチャーとして位置づけられるに至っている。反面、高速道路に設置された照明柱は、増大を重ねる交通流に起因する路面振動や風などにより、苛酷な振動をする場合も散見される。

本研究では、河川、港湾、海峡等の風環境のきびしいところに建設される道路の照明柱を想定のうえ、これらが自然風の下で引き起

要旨

風で生ずるカルマン渦による道路用照明柱の渦励振振動について、八角形断面の高さ8mの実大照明柱を対象にその基本振動特性を解明のうえ、制振装置を考案した。制振装置は一方方向に連続する層状の隔壁の中に制振子として鋼球を有する衝撃減衰器を用いた。鋼球は照明柱の振動に同期して運動し、容器壁に衝突することにより、振動エネルギーを減衰させる。鋼球の運動と衝撃力に関する基礎実験を行って試作した衝撃減衰器を照明柱に内装して振動台による振動実験および大型風洞実験を実施した。その結果、本衝撃減衰器は照明柱の面内および面外に関する1~3次渦励振振動に対し、極めて有効なる制振効果を発揮することが実証できた。

Synopsis:

Basic vibrational characteristics of a lighting pole resulting from wind vortex-induced oscillation have been studied and an impact damper which has layered cells accommodating steel balls has been developed. Steel ball movement synchronizes with the oscillation of the pole and collides against casing, and the damper reduces oscillation energy. Based on the results of basic experiments with movement of steel balls and impact force, impact dampers have been manufactured and attached to the inside of the pole. Vibration tests using a vibration machine and wind tunnel tests have been executed. The results indicate that the impact dampers are effective in reducing the 1st to 3rd inplane and out-of-plane oscillations of the pole.

こすカルマン渦による渦励振振動を対象に、その現象を究明するとともに、制振の方法について簡便かつ有効な衝撃減衰器を提案した。さらに、その制振効果について振動台を用いた基礎試験および制振子の運動性状把握試験ならびに実大照明柱を用いた大型風洞試験を実施のうえ、衝撃減衰器を装備した照明柱の有用性を報告するものである。

2 照明柱の振動実験

2.1 実験概要

照明柱の振動特性および制振装置の機能と効果の解明を目的として振動台を用いて振動実験を実施した。Fig. 1に示す要領で高さ8mの八角形断面を有する実物照明柱を振動台に設置のうえ、正弦波入力により加振した。供試体照明柱の諸寸法は図中に表示したとおりである。実験ではまず供試体照明柱の基本振動特性、すなわち共振振動数や振動モードなどの調査を行った。ついで新規考案した制振装置を用いてその制振効果を調査するとともに合理的制振効果を得るための要因について考察した。

* 昭和63年9月6日原稿受付

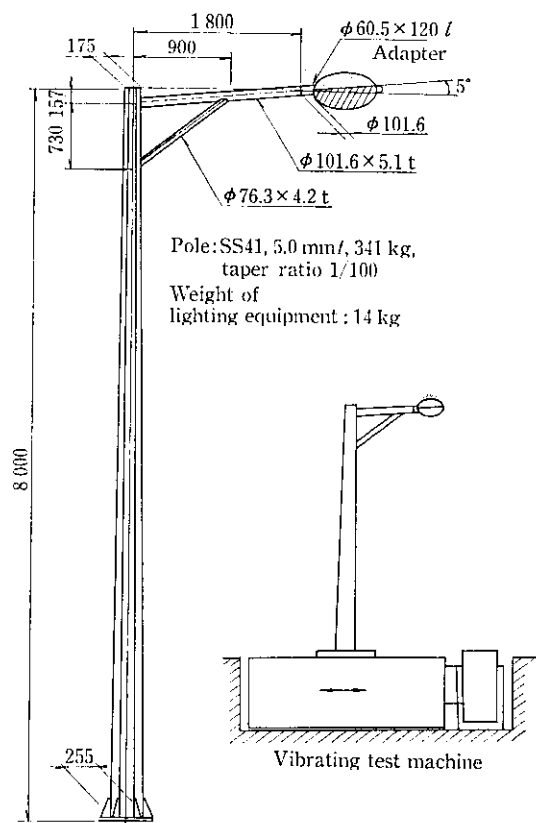


Fig. 1 Highway lighting pole with octagonal cross section and outline of vibration test machine

2.2 基本振動特性の調査

Table 1 に示すように、供試体照明柱の各部位に加速度計を設置のうえ、加振力一定の条件下で振動数を変化させる掃引試験を実施して、共振振動数を求めた。この結果を一括して Table 2 に示す。なお、カルマン渦による渦励振振動の場合には、次式で表現される関係式で現象が説明される。

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

ここに, S_i : ストローハル数

N : 風の流れにある物体の振動数

D : 物体の代表径

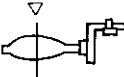
V : 風速

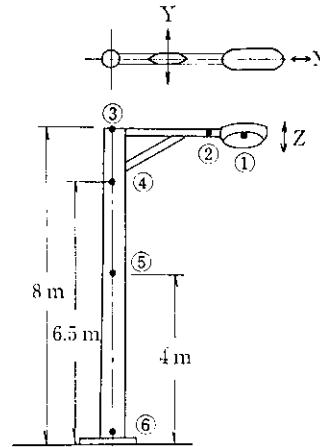
Table 2 に示した共振振動数と供試体照明柱の代表径および山田ら¹⁾によるストローハル数を参考に $S_L=0.18$ と仮定のうえ、式(1)に代入すれば、本供試体照明柱のおおよその共振風速が求められるが、それらは Table 2 に併記するとおりである。これらの諸値は後述する風洞試験により、確認される。

2.3 制振装置

カルマン渦により励起される塔状構造物の振動に関しては、数多くの研究がなされており、その制振手段としては(1)構造物の断面剛性を増大させ共振風速を設計風速以上にする方法、(2)構造物の質量を増大させて振動振幅を減少させる方法、(3)構造物の減衰定数をあげて応答倍率を低下させる方法、(4)渦励振力を打ち消すような減衰装置を設置して振動エネルギーを低下させる方法および(5)構造物の表面に突起を付与したり、また断面形状を変化させて、カルマン渦の発生を妨げるか周期を乱すよう空気力学的

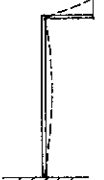
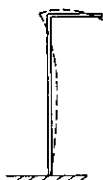
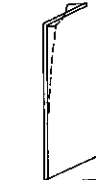
Table 1 Measurements of octagonal pole during vibration test

No.	Measured point	Measured item	Direction*1			Instrument for measurement
			Y	X	Z	
①	Lamp 	Acceleration	○	○	○	Acceleration gage
②	Tip of arm 	Acceleration	○	○	○	Acceleration gage
③	Top of pole	Acceleration	○	○		Acceleration gage
④⑤	Side of pole	Acceleration	○	○		Acceleration gage
⑥	Bottom of pole 	Shear stress	○	○		Strain gage
		Bending stress	○	○		



*Y: Out of plane X: Inplane Z: Vertical

Table 2 Basic oscillation characteristics of octagonal-cross-section lighting pole

	Inplane oscillation mode			Out-of-plane oscillation mode		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Oscillation mode						
Frequency in the resonant state (Hz)	2.9	12.3	22.5	2.9	7.3	20.8
Resonant wind velocity calculated (m/s)	3.5	14.7	25.6	3.5	8.7	24.8

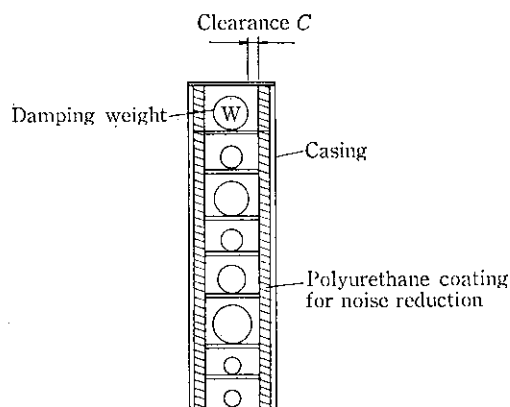


Fig. 2 Impact damper using steel balls

な工夫によって振動を制御させる方法などが考えられる。本研究で対象とするような道路用照明柱においてはできる限り広範囲の風速に対応可能な制振方法を採用せねばならず、また美観上の問題、種々のデザインへの対応、設置場所の制約などの問題から、上記の制振技術のうち、(4)が最も現実的な解決方法と考えられる。したがって、ここでは、産業機械分野で有効な制振装置として用いられている衝撃減衰器を応用のうえ改良して適用することとした。考案された衝撃減衰器を Fig. 2 に示す。照明柱という細長の構造物に内挿せねばならない制約から、縦長の容器内に階層状に衝撃室を複数個設け、各室に適当な質量の制振子を挿入のうえ、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工夫した。制振子の衝撃力により振動エネルギーを弱めるには、当然のことながら与えられた条件下で最大の衝撃力を発揮するよう設計する必要があるが、これには

- (1) 制振子の最適質量
- (2) 制振子の大きさや材質
- (3) 制振子が運動すべき間隙(遊間)
- (4) 反発係数を左右する容器の剛性

などを総合的に考慮して設計せねばならない。

衝撃減衰器に関する既往の研究²⁻⁵⁾では、(a) 制振子が構造物

の振動と同調して安定な運動をするとき、遊間は大きいほど制振効果が高い、(b) 遊間一定の条件下では構造物と制振子の質量比は大きいほど制振効果が高い、(c) 制振子が衝突する面の反発係数は大きいほど制振効果は高い、などの知見が得られているが、本研究で対象としている照明柱は上述のように細長い構造物であり、これに適用すべき衝撃減衰器も狭い箇所に設置せねばならないので、必ずしもパラメーターの選定に自由度があるわけではなく、むしろ制約の方が大きい。したがって、上記設計要素(1)~(4)の大略をつかむため制振子運動の基本特性解明実験を実施した。

2.4 制振子の基本特性

本研究における衝撃減衰器の設置位置は、原則的には、Table 1 に示したような基本振動モードにおいて振幅の大きい部位とする。しかしながら対象構造物である照明柱は通常美観上の問題からその支持基部から照明具のある先端部にかけて断面が漸減するよう設計されており、振幅の大きい先端部では減衰器設置に場所的制約を受けることが多い。したがって、ここでは、Table 1 の振動モードと減衰器設置可否とを考慮して面内1次および面外1次、2次に対しては照明柱の幹部最上端近傍、また、面内2次、3次および面外3次に対しては幹部の中央部近傍とした。幹部最上端近傍の断面寸法は照明柱の高さにもよるが、通常直径100~150 mm 程度となることが多く、さらに先端部照明具に通電するためのケーブル用の空間も必要となることから、減衰器容器の外径は50~70 mm 程度と寸法的制約を受ける。

一方、前節で述べたように制振子は限られた空間ででき得る限り有効な衝撃力を必要とすることから、材質的には質量が大きくかつ反発係数も大きいことが要求されるが、効果、加工性、経済性等を考慮し鋼球を適用することにした。鋼球はボールベアリング用のものを使用し、鋼球の径と遊間が衝撃力に及ぼす影響を調査するため、Fig. 3 に示すような装置を考案のうえ、これを振動台に設置して Table 1 における各振動モードでの固有振動数のもとで衝撃力を求めた。

衝撃力は得られた衝撃波形を時間積分して力積の形で表現するのが正しいが、ここでは衝撃力の作用時間が非常に短いこと(実測では10~15 ms 程度)および衝撃力の大概値を求める目的から、ロー

Diameter of steel balls: 50.8 mm ϕ
 Weight of steel ball: 0.54 kgf
 Finished surface: #150

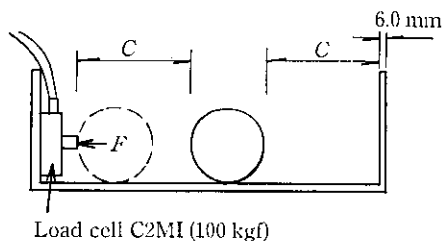


Fig. 3 Basic experiment set up for movement of steel ball and measurement of impact force

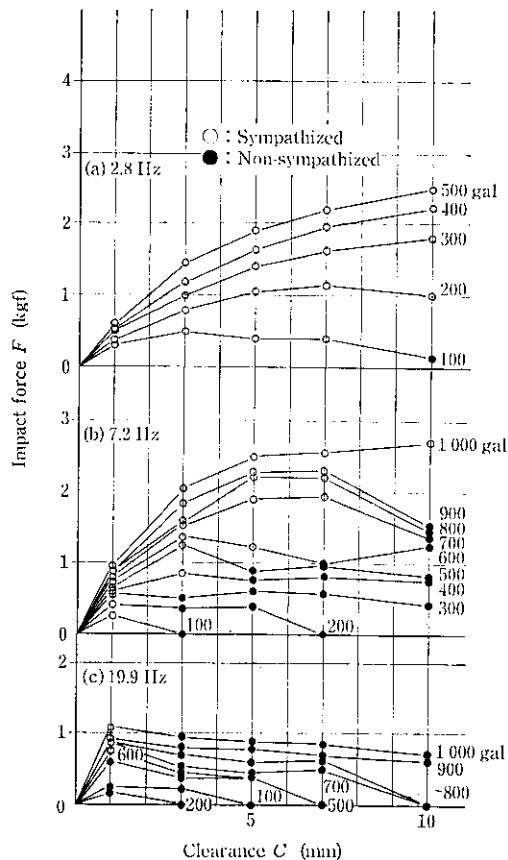


Fig. 4 Relationship between impact forces and wall distance

ドセルの出力より得られた最大値を便宜的にそのまま用いた。固有振動数が2.8, 7.2および19.9 Hzにおける衝撃力の測定結果をFig. 4に示す。衝撃力は鋼球とロードセルとの衝突状況により、かなりばらつくが、多くの実測値のうち最大のものを図示した。また、鋼球の表面はクロムメッキであり、運動面は黒皮のままとした。これは衝撃減衰器が供用中に摩擦面が錆などで状態が悪くなる場合を想定したものであるが、別途同様に実施した研磨面や軽い発錆面などでも本実験の範囲内では、衝撃力はほとんど大きくは変わらないことが確認された。Fig. 4から判明するように1次の固有振動数2.8 Hzではおおむね同期運動しており、当然のことながら鋼球質量が大きいほど衝撃力も大きい。また、小さい鋼球は大きいものに比し衝撃力は小さいが、同期運動可能な遊間の範囲が広いことがわかる。面外2次の固有振動数7.2 Hzでの同期運動でも同様のことが言えるが、加振力が小さい場合は同期遊間の範囲が狭くな

る。さらに面外3次に対応する19.9 Hzでは同期遊間は非常に狭くなり、3 mm以下であることがわかる。したがって、低次ほど大きな鋼球と遊間、高次ほど小さな鋼球と遊間にすることが望ましい。

以上のような知見をもとに効果的な衝撃減衰器を選定せねばならないが、Table 1に示した共振風速のうち、25 m/s近傍で発生する3次振動は特殊な場合とみなしてここでは除外し、まずは面外1次および2次の発生頻度が高いと考え、これらを制振の対象とする。減衰器容器は上述の空間制約から1辺60 mmの角型とし、厚さ2.3 mmの鋼板を使用するものとする。このとき、衝撃室の有効空間は55.4 mmとなること、また、一般的に制振子の質量は振動体質量の1~5%程度であること、減衰器が長尺にならないことなどを勘案して、少数の鋼球で大きな衝撃力が得られるよう50.8 mm ϕ の鋼球を用いることとした。

2.5 衝撃減衰器の制振効果

前節で選定した減衰器(容器寸法60 mm $\times$ 60 mm $\times$ 2.3 mm ϕ 、鋼球50.8 mm ϕ 、0.539 kg、遊間4.6 mm)の制振効果を調べるため、Fig. 1の供試体照明柱に装着のうえ、基本振動特性実験と同様の要領で振動台上にベースプレートを経て4本のボルトにて固定して加振した。減衰器の装着位置は照明柱主幹部上端であり、制振子の個数を最大13個(照明柱との質量比約2.8%)とし、順次個数を減らして制振効果に及ぼす質量比の影響を調査した。なお、加振力に関しては風による励振力は照明柱の高さ方向に分布する強制力であるのに対し、振動台では照明柱の下端部よりの単純な強制力であり、現象を必ずしも正確に捉え得ない面があるうえ、さらに共振時の励振力も明確ではない。したがって、振動試験は各固有振動数に対し、種々の加振力について実施したが、面内1次では5 gal以下、2次では20 gal以下で制振効果が顕著であり、また、面外1次では10 gal以下、2次では25 gal以下で同様であった。それぞれについて制振効果の1例を示せばFig. 5のとおりである。図より明らかなように、各振動モードとも質量比が大きいほど制振率が高く、本減衰器では2.1%程度でおおむね最高の効果が得られる。すなわち、面外1次振動で約90%、面外2次振動、面内1次振動で70~80%の制振率を示している。当然のことながら、面外振動では1次の場合が

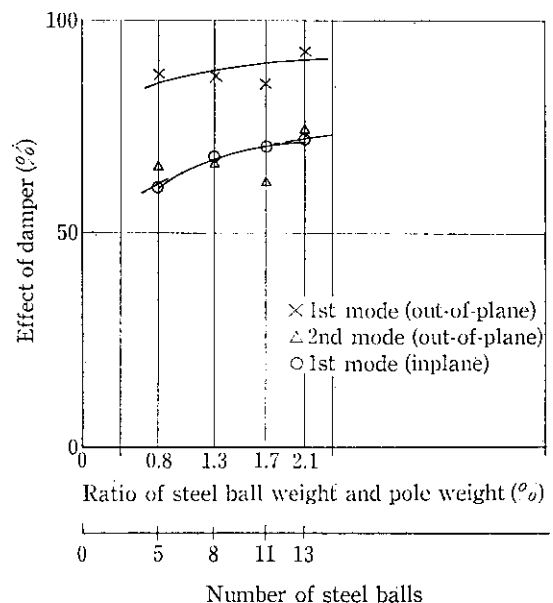


Fig. 5 Damping effects of the devised impact dampers (50.8 mm ϕ steel ball)

2次の場合よりも制振効果が良く、また面内1次は面外2次とほぼ同等の制振率であることがわかる。これは面内振動の方が面外振動に比し、照明具のついた枝管部が同一面内で曲げ振動するため、振動エネルギーが大きく、制振しにくくなっているものと思われる。

3 風洞実験

振動実験後、風による照明柱の振動特性と振動実験で選定した制振装置の効果を確認するため、風洞実験を行った。試験体は振動実験と同じものを使用した。実物に近い大きさの試験体のため、吹き出し口の寸法が10m×3mの大型風洞を用いた。

3.1 実験概要

本実験における主な測定項目は次の2つである。

- (1) 風による照明柱の振動特性、すなわち構造減衰と風速に対する変位または加速度応答
- (2) 各制振装置の効果

実験条件をTable 3に示す。風向は、実橋で橋軸直角方向に風を受けることを想定し、照明柱の面内方向とした。

風洞実験は主に、無風状態で行う予備実験と、送風状態で行う本

Table 3 Conditions of wind tunnel test

Type of damper	No. of test levels		Type of test	No. of test cases
	Wind direction	Logarithmic decrement		
No damper	1	3	V-A test	3
Steel balls	1	1	V-A test	1

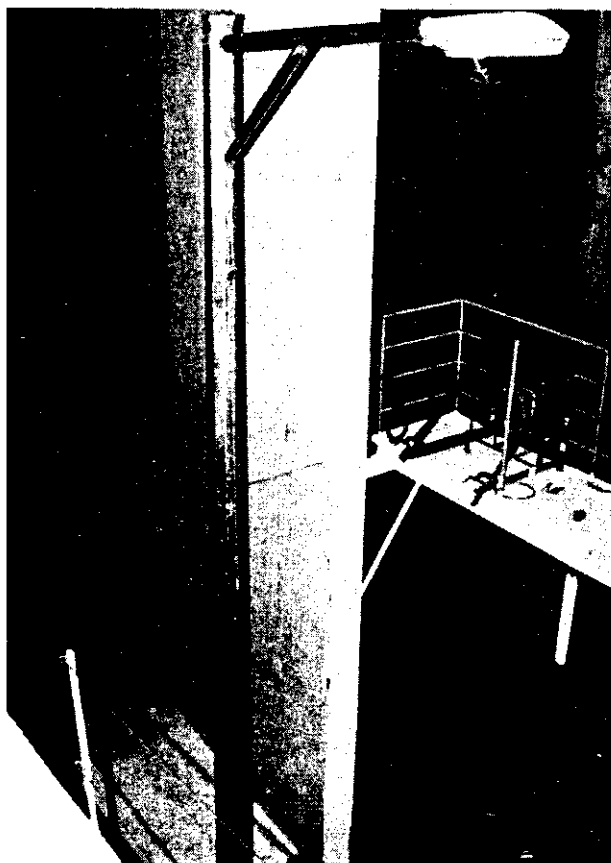


Photo 1 Overview of wind tunnel test of octagonal-cross-section lighting pole

実験とに分けられる。予備実験では、電磁ダンパを起振機として使用し、振動モードを再確認した。さらに電磁ダンパを調整して3種類の構造減衰(対数減衰率)を設定し、各振動モードに対する応答値を測定した。本実験では、送風時の風速と照明柱の加速度応答および変位応答の関係を調べた。風速は1~25 m/sとした。衝撃減衰器は渦励振がみられたモードについて前節の振動台による基礎実験と同様に最適な位置に取り付けた。実験の状況をPhoto 1に示す。

3.2 実験結果

本研究では主に八角形ポールを用いた場合の結果について述べる。Fig. 6に種々の風速に対するポール頂部における変位応答値を示す。 $V=4$ m/s付近で面外1次モード、 $V=9$ m/s付近で面外2次モードの振動がみられた。また、 $V=25$ m/s付近で面外3次の振動の発現動向が観察される。ただし、アナログフィルターにより振動波形を振動モード別に分離した結果、 $V=25$ m/sでは、頂部変位振幅5.3 mmのうち、面外1次モードによる振幅が2.9 mm、面外2次モードが1.8 mm、面外3次モードが0.8 mmと複数の振動モードが組み合わさった振動であることがわかった。この時の面内1次モードの振幅は4.0 mmと大きく、このような高風速域では、風洞内のわずかな風の乱れ(強弱)により、カルマン渦による振動のみでなく、複雑な振動形態を示すことがわかった。面外1次および2次モードについてストローハル数を共振風速、振動数より計算すると $St=0.16\sim0.17$ となり、山田¹⁾の実測データとほぼ同じ値であった。

Fig. 7に照明柱枝管部先端(灯具取付部)における風速と加速度

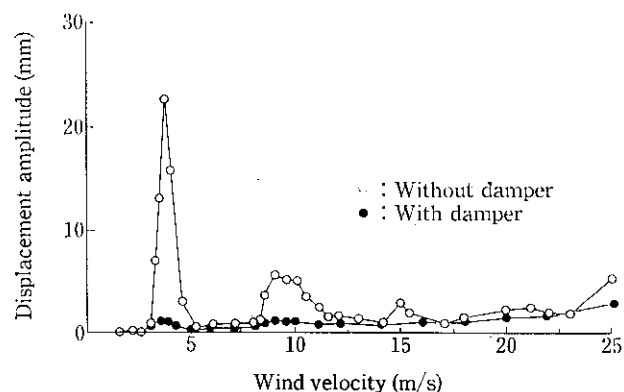


Fig. 6 Effect of wind velocity on the displacement amplitude of the top of the pole

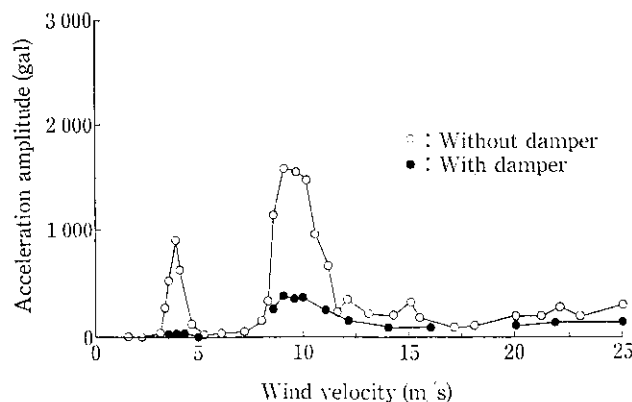


Fig. 7 Effect of wind velocity on the acceleration amplitude at the tip of the arm

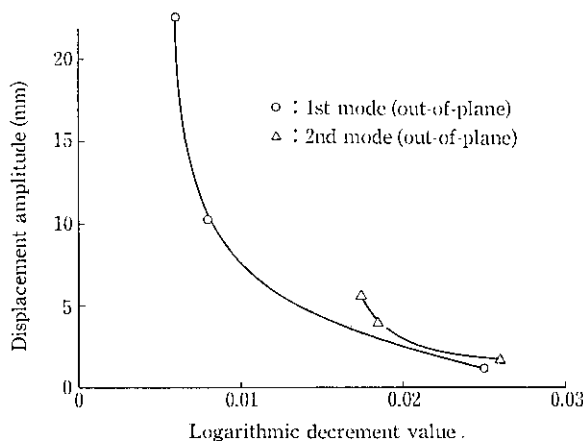


Fig. 8 Effect of logarithmic decrement on the displacement amplitude at the top of the pole

Table 4 Logarithmic decrement value

Mode	Without damper	With ball damper
1st deg.	0.004	0.06
2nd deg.	0.01	0.04

関係を示す。加速度振幅の大きさは面外 2 次モードで最大値となっている。面外 3 次振動での加速度は $V=25$ m/s で 295 gal 程度であった。

鋼球を用いた衝撃減衰器を取り付けた場合の変位、加速度振幅を比較対象のため Fig. 6 および 7 に黒丸で併記した。ポール頂部の変位は面外 1 次モードで約 1/20、面外 2 次モードで約 1/5 であり、アーム先端の加速度は面外 1 次モードで約 1/25、面外 2 次モードで約 1/4 と、いずれも大きな制振効果が得られた。

構造減衰（対数減衰率）と振動振幅の関係は Fig. 8 のようになる。対数減衰率が 0.02 以上であれば、面外 1 次モードおよび 2 次モードでは振動がかなり小さくなることがわかる。衝撃減衰器を取り付けた時の対数減衰率を Table 4 に示す。制振装置を取り付けない場合に比べ大きな対数減衰率が測定されており、前記の制振効果が大きいことを証左している。

なお、今回は記述しなかったが、著者らの実験では、円形ポールについても八角形ポールと同様に、制振効果を確認している。

4 減衰器の設計

本研究で対象としている衝撃減衰器はかなりの制振効果を発揮することが判明したが、これを実用に供するためには Fig. 9 に示すような手順により設計しなければならない。すなわち、照明柱の諸寸法や照明具の重量、照明柱の支持状態などの構造条件および風向や風速などの気象条件が与えられれば、まず前者を用いて固有値解析が実行でき、その結果として、対象とする照明柱が自由振動する場合の固有振動数、固有周期や振動モードが判明する。固有振動数と照明柱の断面形状および外径が与えられれば、式 (1) において S 、 N および D が与えられるので共振風速が得られる。ストローハル数 S については、特殊断面形状の場合には別途風洞実験などにより求める必要がある。共振風速が与えられれば、照明柱の設置状態や気象条件または客先仕様としての設計最大風速と対照して実際にカルマン渦による渦励振振動が発生するか否かの判定が可能となる。照明柱の場合、ストローハル数が 0.1~0.2 程度であり、

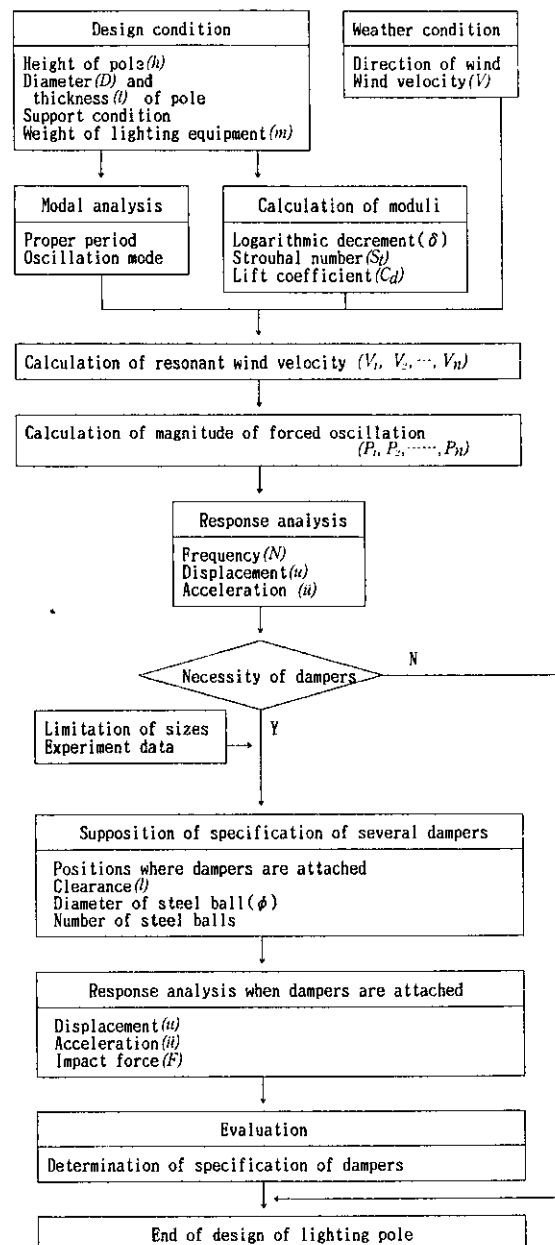


Fig. 9 Design flow chart for lighting pole with impact damper for effect of wind

また代表径が 100~200 mm、1~3 次固有振動数が 1~20 Hz であるので 3 次共振振動でも風速 20 m/s 前後で発生する。したがって、通常はカルマン渦による渦励振振動に対する検討は必要である。カルマン渦による渦励振振動は周期的に発生する変動揚力による強制振動であるので、応答解析は可能である。この場合、前提としては次式で与えられる強制外力における揚力係数 C_L が求まっている必要がある。

$$L(t) = \int_0^h \frac{1}{2} \rho V^2 D C_L e^{i\omega_n t} dh \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $L(t)$: 揚力

ρ : 空気密度

h : 照明柱の高さ

ω_n : n 次振動周期

C_L の値については、古くから研究⁶⁻⁹⁾されており、その多くは煙突などの塔状構造物に関するものである。カルマン渦による渦励

振振動が発生し、風と照明柱が同調しているとき、次式の関係が成立すると言われている。

$$C_L = \frac{8m\pi N^2 \delta}{\rho V^2 l} \left(\frac{a}{D} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 m : 振動物体（照明柱）の質量

δ : 対数減衰定数

a : 変位振幅

式（3）が照明柱にも適用できるものとし、前節における風洞実験で得られた諸値を用いると八角形断面を有する照明柱の揚力係数は約 0.3 程度であることが判明する。 C_L に関しては不明な点も多々あり、合理的な設計のためには、精緻な風洞実験が必要である。

式（2）式を強制外力として応答解析を実行すれば、対象となる照明柱の振動変位などの諸応答が求まるが、解析方法としては例えば Y. Ogata ら¹⁰⁾に示されるものが考えられる。諸応答が判明すれば、制振率に対応する許容変位などが満足されるように、任意の位置に任意の大きさの制振力を上述の強制外力と同様に考慮して応答計算をくり返し実行することにより制振力が求まることになる。制振力が求まれば前述のように減衰器の制振子の衝撃力と遊間との関係が実験的に得られているので、減衰器設置位置の空間的制約とを考え合わせるにより、適性な制振子の個数、寸法、遊間などが求められることとなり、本研究における合理的な衝撃減衰器が設計される。

5 結 言

本研究では、道路用照明柱のカルマン渦による自励振動を抑制する方法について、まずは照明柱の基本振動特性を調査し、ついで衝撃減衰器を考案のうえ、振動台による制振効果検討のための基礎試験を実施し、ある程度の効果が得られることを確認のうえ、大型風洞を用いた実大試験を実施して減衰器制振効果を実証した。これらの一連の基礎実験ならびに実証試験から得られた諸知見をまとめて列挙すれば以下のようなものである。

- (1) 本研究で考案した一方向に多数の衝撃室を配列した衝撃減衰器を用いれば、カルマン渦による渦励振振動に対し、相当な制振効果が得られる。
- (2) 衝撃減衰器は本研究で例証した八角形断面柱では制振子の重

量（大きさと個数）と衝突までの運動距離である遊間とを適当に選定することにより、面外 1 次振動（共振振動数 2.9 Hz）に関しては振動台による基礎試験および実大風洞試験ともに減衰器を設置しない場合に比し、90% 程度振動振幅を低減することが可能である。

- (3) また、面外 2 次振動（共振振動数 7.1 Hz）に関しては、1 次振動の場合と同様に有効な制振効果が得られるが、大きな振動エネルギー下でのかなり小振幅の振動であるので、1 次振動の場合に比し若干低い制振効果とはなるが、絶対値としては 70～80% 程度は低減可能である。
- (4) 制振子の運動に関する実験から、制振子が同一重量の鋼球では、低加振動数の場合、減衰器容器と同期運動可能な遊間はかなり広範囲であり、傾向として遊間が大きいほど衝撃力も大きい。これに対し、高加振数の場合は同期運動するための遊間範囲は狭くなる。
- (5) したがって、減衰器の設計では低次振動対策の場合には比較的大きな制振子と遊間等を選定する必要があり、また高次対策の場合には比較的小寸法の制振子（この場合、制振子の個数は多くなる）と遊間等を選定するなどの十分な配慮が肝要となる。
- (6) 実物大の八角形断面照明柱の風洞試験により、本照明柱が受ける強制振動外力を左右する空気揚力係数 C_L は大略 0.3 程度であり、既往研究における円形断面のそれとほぼ同程度の大きさであることが判明した。

以上の知見より、本研究で用いた八角形断面照明柱と同程度の剛性を有する照明柱では、衝撃減衰器を代表とする制振装置を組み込むことで風によるカルマン渦励振振動をかなりの程度制御することができると判明した。今後の問題として本研究で考案採用した衝撃減衰器では衝突音対策も必要である。簡易法としては衝突面に樹脂塗装することで対応している。さらには、狭隙な部所に減衰器を設置せねばならないので効率の良い設置方法、また、耐久性を上げるための防食対策なども研究開発要素である。これらについては別途報告の場を設けたい。

おわりに本研究に際し御指導いただいた九州大学工学部機械工学科末岡淳男教授、風洞実験を担当していただいた三菱重工株式会社齊藤通主任、設計面で協力していただいた東洋技研コンサルタント株式会社島田室長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 山田勝彦, 秋元茂男: 「大鳴門橋照明用柱の耐風検討」, 本四技報, No. 36 (1985), 26-29
- 2) 得丸英勝, 小寺 忠: 「衝突による連続体の制振について」, 日本機械学会論文集, 35 (1969) 277, 1861-1873
- 3) 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
- 4) 安田仁彦, 豊田 満: 「衝撃ダンパの制振作用について」, 日本機械学会論文集, 43 (1977) 371, 2544-2549
- 5) 大亦絢一郎, 岩田行雄: 「弾性支持された衝撃ダンパの制振効果について」, 日本機械学会論文集, 45 (1979) 395, 854-857
- 6) K. DeGHETTO and W. Long: "Dynamic Stability Design of Stacks and Towers", *J. Eng. Ind. Trans. of the ASME*, (1966), 462-467
- 7) N. Ferguson and G. V. Parkinson: "Surface and Wake Flow Phenomena of the Vortex-Excited Oscillation of Circular Cylinder", *J. Eng. Ind. Trans. of the ASME*, (1967), 831-838
- 8) T. Yano and S. Takahara: "Study on Unsteady Aerodynamic Forces Acting on an Oscillating Cylinder", 1971. Wind Effects on Building and Structure, Tokyo, 737-746
- 9) T. Yamaguchi, K. Shiraki, and S. Umemura: "Vibration Caused by KARMAN Vortex on Bridge Members and its Countermeasures", 1971. Wind Effects on Building and Structure, Tokyo, 747-756
- 10) Y. Ogata, A. Togiya, and M. Yamashita: "Wind-Excited Vibrations of Steel Stacks", 1971. Wind Effects on Building and Structure, Tokyo, 757-766
- 11) 岡内 功, 伊藤 學, 宮田利雄: 「耐風構造」, [丸善], 52