

個別検討内容の報告(No.6)

- § 1. 題 目 チェーンダンパーの制振効果
- § 2. 日 時 昭和61年 1月16日
- § 3. 発表者 望月 晃海 <住友金属工業 鉄構技術部>
- § 4. 概 要

本四連絡橋大鳴門橋において、照明柱が風によるカルマン渦共振現象を生じたため、その制振装置としてチェーンダンパーを採用し効果を上げた。

チェーンダンパーは、振動時にチェーンが外装管内壁に衝突して、振動エネルギーを免散することにより制振効果を得る機構で、NASAがロケット(ジュピター)打ち上げの際の制振装置として開発した。照明柱の場合、形状を変えて共振振動数を変更する方法などもあるが、風速が変化する橋梁上では根本的な解決にはならない。このため、チェーンダンパーを提案するとともに、その制振効果に関する基礎的検討および実ボールを用いた振動実験を行った。

実ボールの振動実験を行った結果、チェーン重量比1/25のダンパーで、変位振幅は1/2に減少し、減衰定数も1%に増加して、実用化に十分な制振効果が得られることがわかった。

- § 5. 意見等
- § 6. 備 考

チェーンダンバーの制振効果

1. 概要

本四連絡橋大鳴門橋において照明柱が風によるカルマン渦共振現象を生じたため、その制振装置としてチェーンダンバーを採用し効果を上げた。

チェーンダンバーは振動時にチェーンが外装管内壁に衝突し振動エネルギーを免散する事により制振効果を得る機構でNASAがロケット（ジュピター）打ち上げの際の制振装置として開発した。照明柱の場合、形状を変えて共振振動数を変更する方法などもあるが、風速が変化する橋梁上では根本的な解析にはならない。このためチェーンダンバーを提案するとともにその制振効果に関する基礎的検討および実ポールを用いた振動実験を行った。

2. 実験結果

(1) 室内モデル実験を行なった結果鋼管の1次振動は、チェーンダンバーを装着した時、

(a) 応答倍率は1/2 以下（平均1/9）に減少し、制振効果の高いことが確認された。

(b) 減衰効果は次式で表わされる。

$$\frac{LM}{l_m} h = \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{d}{x} \right) \quad \left(\frac{d}{x} < 0.8 \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} LM: \text{供試管質量, } l_m: \text{チェーン質量, } h: \text{減衰定数} \\ d: \text{チェーンと外装管との間隔, } x: \text{変位振幅} \end{array} \right)$$

(2) 実ポールの振動実験において、

(a) チェーン重量を増すよりも、最大変位振幅を示す位置にチェーンを装着した方が制振効果が高い。

(b) 2～4次振動モードにおいて、平均的に、より高い制振効果を得るには、ポール上部・中央部に分けて装着する方法が良い。その時、チェーン重量比1/25で、変位振幅は1/2 に低減し、減衰定数は1%に増加し、実用化に十分な制振効果を得ることができる。

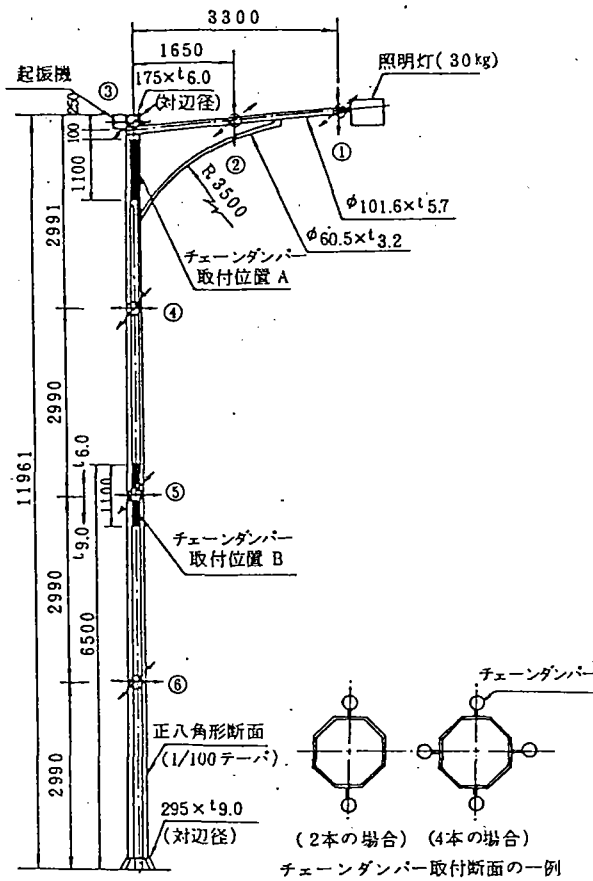


図-1 チェーンダンパー取付位置と計測位置

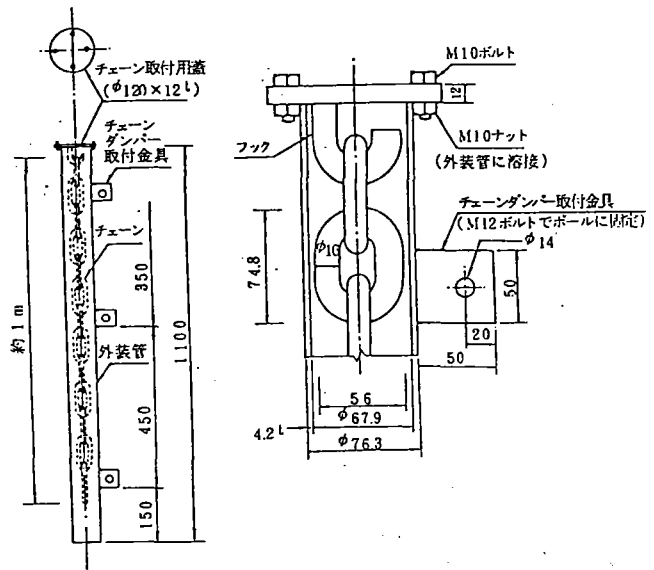


図-2 チェーンダンパーの形状
(チェーンの呼び径16mmの場合)

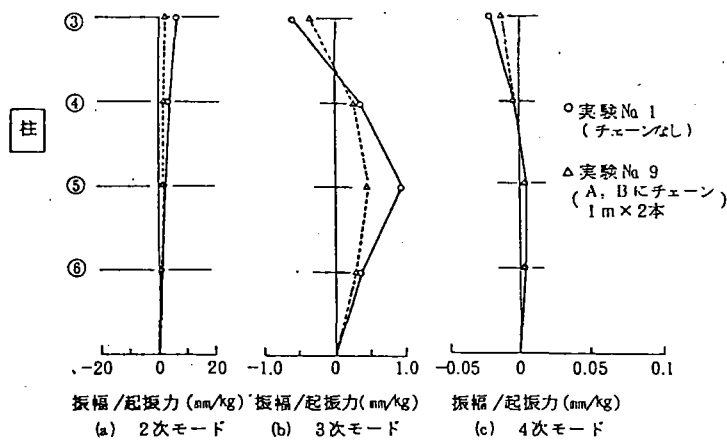


図-3 振動モードの比較

表-1 自由振動実験による減衰定数 (1, 2次振動モード)

実験No	測定位置	1次振動モード		2次振動モード		備考
		測定位置	振動数	測定位置	振動数	
1	橋軸	②	1.59Hz	①	3.85	チェーンなし
	橋軸直角	③	1.62	①	5.28	
6	橋軸	②	1.53	①	3.76	取付位置A, Bに1mチェーン各2本
	橋軸直角	③	1.56	①	5.26	
7	橋軸	②	1.46	①	3.57	取付位置A, Bに1mチェーン各4本
	橋軸直角	③	1.48	①	5.23	

大鳴門橋照明用柱の耐風検討

Wind Proof Study of Illumination Post of the Ohnaruto Bridge

第一建設局 建設部専門役

山田勝彦
Katushiko Yamada

鳴門工事事務所 第六工事長付

秋元茂男
Shigeo Akimoto

1. まえがき

大鳴門橋照明設備は設置に先立ち橋上で現地調査を行うこととされた。試験柱は八角型テーパ柱で、強風時に激しい振動が度々目撃されたので実機計測と風洞試験を実施した。検討の結果、部材の疲労と灯器の耐久性の著しい低下に問題があることが判った。耐風対策は工程上大巾な変更ができなかったため制振装置の追加、対疲労補強及び強化型灯器の使用を考えた。制振装置は新規開発のチェーンダンパを使用した。

一方、大鳴門橋以外の海峡部には丸型テーパ柱を用いた。丸型柱も風洞試験を主とした検討を加えた。その結果、やはり灯器の耐久性が問題となった。制振装置は外観に配慮し整流板によることとし、他は八角柱に準じた対策を取ることとした。

本文は上記内容の要点を報告するものである。

2. 照明用柱の概要

2.1 主要諸元 (図-1 参照)

2.2 静的設計

(1) 設計基準について

柱の設計は「日本照明器具工業会規格・照明用テーパポール (鋼製) JIL 1001-1966改正」によるが、設計風速は地域の特殊性を考慮して別途与えた。また、当基準にない八角柱の風力係数や礎着ボルトネジ部有効断面積に対する疲労限 (σ_r) は、各々1.4、2.5~5.0kgf/m²とした¹⁾²⁾

(2) 設計風速 (V_D)

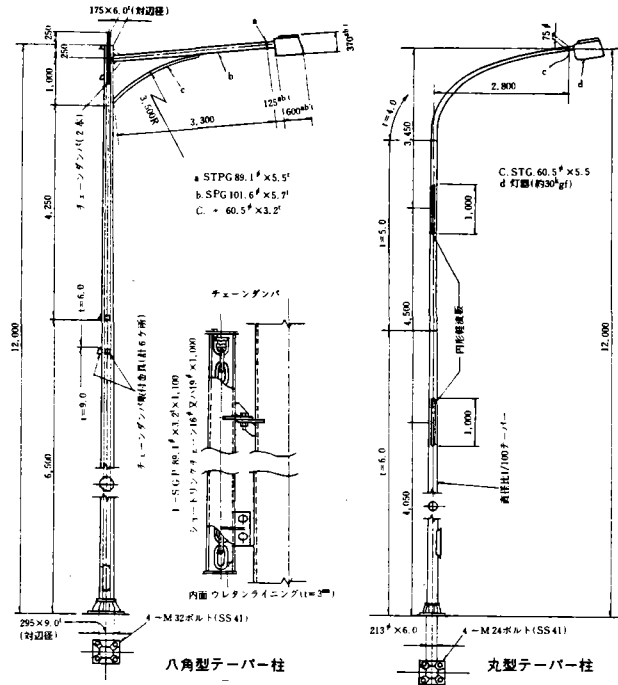
静的設計用 V_D は鳴門海峡の基本風速を重要度、耐用年数を考慮して逡減し、以下、本四耐風設計基準 (1976) により次式で与えた。 $V_D = 53.4 \times \nu_1 \geq 60\text{m/sec}$ ……① ここに ν_1 は高度に応じた補正係数である。

3. 八角テーパ柱 (大鳴門橋区間)

3.1 実機計測、風洞試験と主たる知見

(1) 実機計測 (図-2 参照)

試験柱は鋼床版を架設したあとで横トラス上弦材に建込んだ。計測はNo3柱に加速度計、動歪計をセットし、



	門崎高架橋 上屋1A 大鳴門橋 上屋5A 孫崎高架橋 孫崎土工部 龜浦高架橋				
	至淡路	鳴門海峡	至	至	鳴門
テーパ柱種別	丸型	八角型	丸型	丸型	丸型
数量(本)	34	112	10	5	20
設計風速(w/sec)	69	70.5	69		
基部最大モーメント(tif·m)	4.2	10.1	4.2	3.6	

図-1 照明用柱の概要 (標準寸法で図示)

すぐそばに風向風速計を置き同時記録した。なおNo2柱は灯器による障害が出たのでNo1と共に途中で撤去した。図-3は振動モードで、表-1は静隠時に行った自由振動試験のデータである。表-2は発振時の風と応答値を整理したものである。振動中の風向、風速の変動は概ね $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 0.4\text{m/sec}$ 内である。振動の継続時間は10~数10秒で強弱を繰り返すが、中でもCase.1は定常状態が非常に長いものであった。振動はその方向が風向と略直交しており、ストローハル数の点からカルマン渦励振によるものと思われる。共振時の主要部への影響は表-2のとおりで3次モードが有害である。

(2) 風洞試験 (図-4 にデータの一部分を示す)

(3) 3次モードの年間有効振動数 (n_3)

発振風速を11~14.9m/secとした時の年間延べ吹送

表-1 試験柱の固有振動数と減衰定数(自由振動試験)

振動方向	項目	次数		
		1次	2次	3次
橋軸方向 (面外振動)	振動数(Hz)	1.6	3.85	9.8 (9.7)
	減衰定数(%)	0.25-0.4		(0.36)
橋軸直角方向 (面内振動)	振動数(Hz)	1.65	5.3	10.3 (10.5)
	減衰定数(%)	0.3-0.4		(0.25)

注: () 内はテストピットにおける3次モード実測値

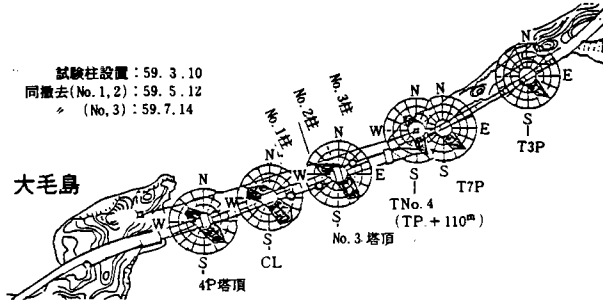


図-2 強風時風向分布(宇都宮)と試験柱位置

時間は920時間 (s 53年度、門崎No.4 データによる) である。その内、振巾が問題となる程大きく発達している時間比率は約7%で、 $n_3 \geq 2.3 \times 10^6$ 回と見積られた。

3.2 振動対策

(1) 照明用柱

礎着ボルトの疲労限から決まる抵抗モーメントはM32 (桁側ボルト孔 $\phi 34\text{mm}$, $\sigma_r \leq 3.0\text{kgf/mm}^2$) として $1.2\text{tf}\cdot\text{m}$ であり、表-2 に示すモーメントの概ね1/3で

表-2 大鳴門橋上実測データ(八角柱主要例)

Case	1	3	5	7	8		
計測日(5月)	3日夜	8日A.M.	9日P.M.	14日	14日		
風向	NNW~NW	NNW	SE	NW	W		
共振時風速(m/sec)	12.7	1.7	5.2	11.7	12.9		
振動方向	面外	面外	面外	面外	面内		
卓越振動数(Hz)	9.76	1.6	3.87	9.82	11.6		
ストローハル数 ¹⁾	0.17	0.20	0.16	0.18	0.20		
最大応答値	加速度 (gal)	B点	3,856	8	69	1,443	2,603
		C点	4,629	32	174	1,867	1,580
		D点	(断線)	39	271	212	1,589
	C点片振巾(mm)	12.4	3.2	2.9	4.9	3.0	
	A点モーメント(tf·m ²)	3.1	0.08	0.14	1.2	1.2	
角型灯器中心 ³⁾ の加速度(G)	* 1.7-2.9	** 0.05	0.25	* 0.3-0.5	** 2.5-3.6		
振動継続時間(sec)	408	-	300	139	249		
当日の観測時間(hr)	15.5	-	7.5	7.5	7.5		

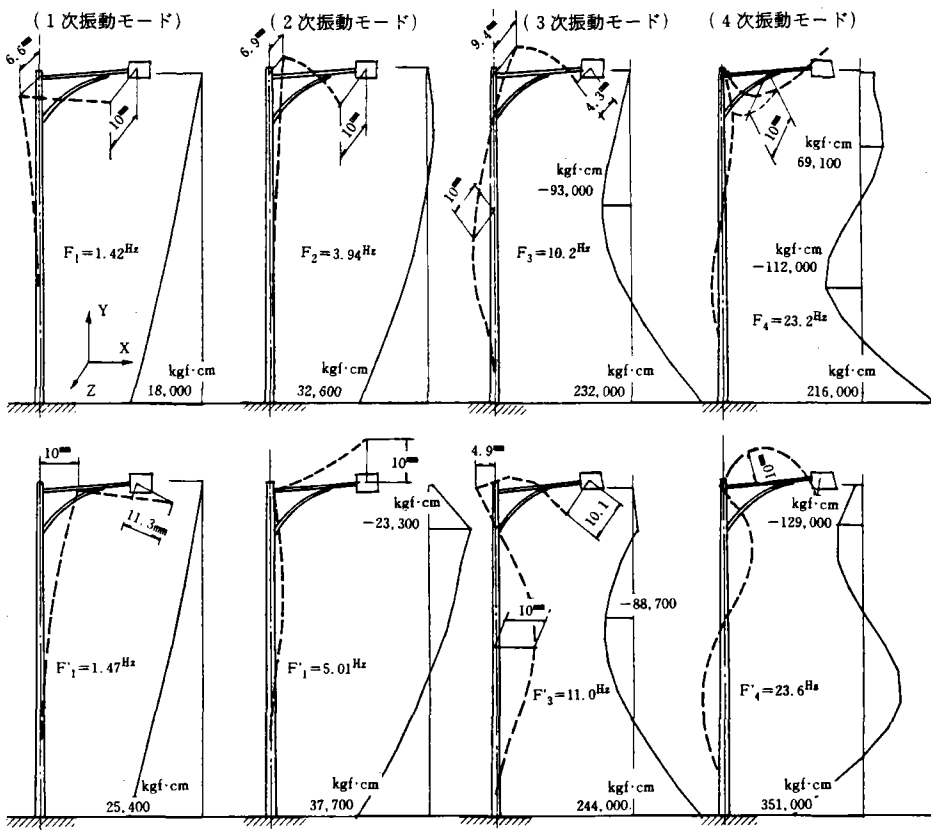
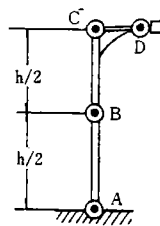
注: 1) B点の対辺距離(d=0.22m)を用いた見掛値

2) 最大変位から求めた計算値

3) (実測値) $\times \frac{\text{(灯器中心の変位)}}{\text{(実測点の変位)}}$ として求めた値を示す。

*は灯器部を3次元F.E.M.他を骨組としたモデル

**は灯器部を3質点に分割した骨組モデルによる値(灯器重量は約30kgfでアーム部剛性の影響が大きい。)



(上段: 面外振動, 下段: 面内振動, 解析値)

図-3 八角柱(原案)の振動モードと単位変位を与えた時の曲げモーメント図

ある。従って制振巾はこれを目標とし、疲労対策のため原案に対し灯器取付部の補強、格点部補強及び溶接の見直しを行った。なお礎着ボルトは変動張力の管理を目的として4tf/本のプレストレスを導入した。

(2) 灯器

灯器は解析並びに加振台による調査を行い、細部を補強した。この強化型は、灯器中心位置で1.5G(取付部0.75G)を耐用限とした。灯器部の加速度は面内振動の時に厳しく、実測 Case. 8を対象とすると振巾は1/2.5以下にする必要がある。但し、橋軸方向風の発生頻度は一部の場所を除いて少ないので少しは甘くし得る。

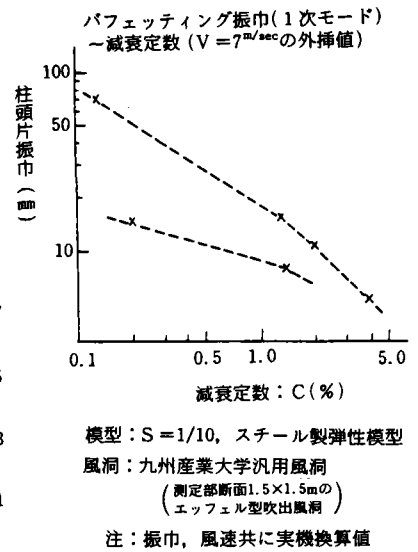
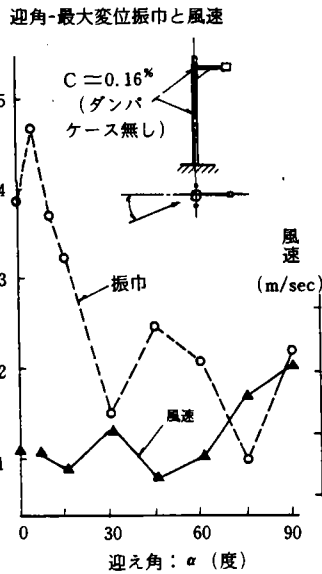
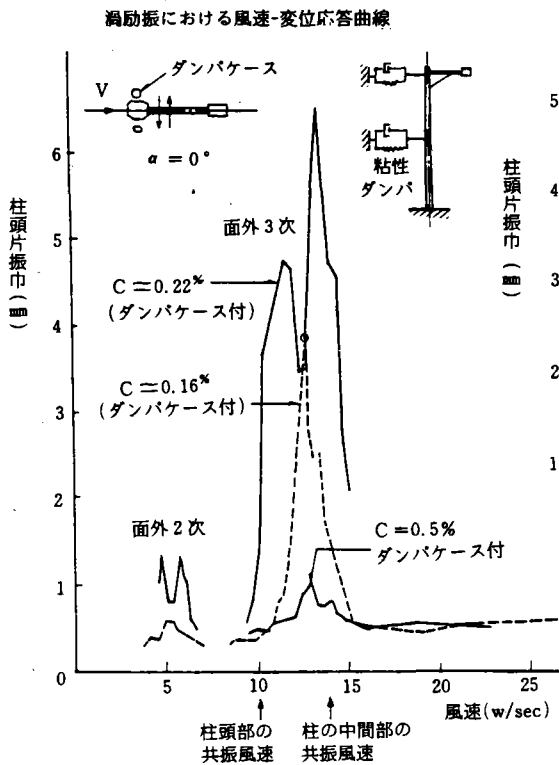


図-4 3次元模型風洞試験応答値

(3) パフェッティングについて

風洞試験値を外挿して得られた $V_D = 70 \text{ m/sec}$ における柱頂部の片振りは約40mm (基部モーメント約1.1tf・mに相当) である。実機では2~3倍になる可能性があるので、制振対策を施すことが望ましい。

(4) 制振方法の選定³⁾⁴⁾

当初は整流板やツル巻きによる空力的な方法を考え、2次元風洞試験を行ったが良好なものは見出せなかった。並行して、照明柱の質量比が非常に大きいので減衰性を付与した時の試験を行い、その効果を確認した (図-4参照)。ダンパは適当なものが無いので方向性・耐久性を考慮してガス管内にチェーンを吊るし、衝突によりエネルギーを吸収させる方法 (以下チェーンダンパと云う) を考え基礎試験により有望なことを確認した。別途砂詰め鋼管も検討を加えたが無効と結論された。

3.3 チェーンダンパの開発と装着計画

(1) 実装試験

チェーンダンパの減衰量は、チェーンと外挿管の諸元と振動に依存する。定量的に把握することは簡単ではないので試験柱を円形ピット (住金・波崎研究センター) 内に移し一連の実装試験を実施した。試験は呼び径16mm、長さ1.0mのショートリンクチェーンと外径89.0mmのS.G.P.を標準とし、諸元及び装着本数を変数としている。加振方法は引綱法による自由振動と頂部にセットした起振器による強制振動との2方法によった。試験データの一部を図-5に示す。チェーンダンパの効きは試験範囲内ではチェーン重量と振巾が支配的と見られる。

(2) 装着計画

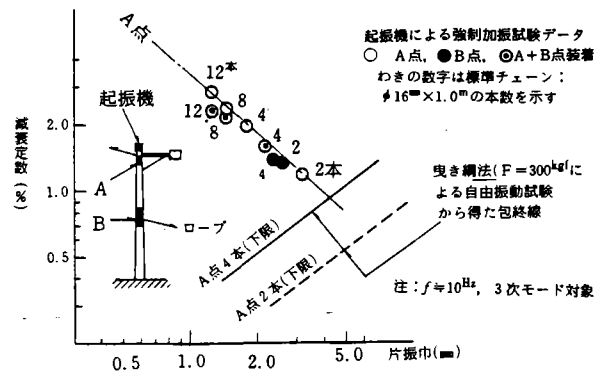


図-5 実装試験による照明柱の振巾と減衰定数(例)

減衰附加により低下した振巾を基に所要の減衰定数が得られるまでチェーン重量を増加させる。3.2節に記した制振巾を確保するのに必要な、照明用柱全体の減衰定数は、面外及び面内振動に対し各々0.8~1.2及び0.6~0.9%と推定できる。装着位置は外観に配慮して柱頂部とし、且つ振巾の拡大をねらって、さらに25cm上に出した。チェーンの所要量は先の必要減衰定数に対し呼び径16mm長さ1.0m物換算で、各1.9~2.0及び2.4~3.0本と設定した。実装は振動特性をズラす目的で呼び径16及び19mm (16mm換算で1.4本) 各1本の計2本とした。チェーン重量は合13.4kgfで、照明用柱全体870kgfの1.5%に相当する。パフェッティングに対しては振動数が小さくなるので量的な評価は難かしいが、発生音や基礎試験からある程度の効果は期待できると考えている。

(3) チェーンダンパ音軽減対策

チェーンの衝突音は遠方までよく響くので外挿管内壁に3mm厚のポリウレタンライニング (-24dBの効果) を施し問題の解決を図った。

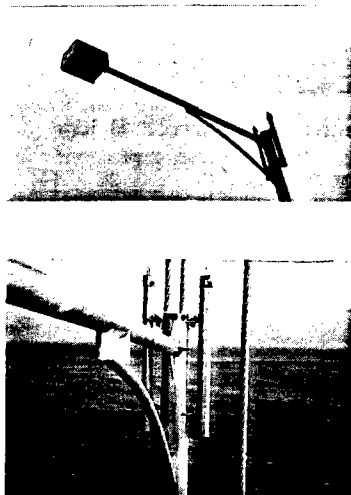


写真-1
八角型柱頂部

4. 丸型テーバー柱（大鳴門橋を除く区間）

4.1 振動概要

解析とスチール弾性模型（ $S=1/10$ ）を使った風洞試験により検討を加えた。風速・変位応答は $C=0.16\%$ の場合実機換算、 $5\sim 8$ 及び $15\sim 20\text{m/sec}$ の風速域で3（ $f=8\text{Hz}$ ）及び4次（ $f=18.5\text{Hz}$ ）モードの渦励振が見られた。また迎え角が 90° の気流では面内3、4次モードの他に広い風速域で灯器収納箱の渦励振と思われる大きな面内2次モードの振動が見られた。面内4次モードの灯器の加速度は前記耐用限を超える。

4.2 耐風対策

制振方法は一連の試験により開発した整流板により様子を見ることとした。丸型柱の場合振巾が小さいのでチェーンダンパの効きは良くないと思われる。外観は馴染みにくいが、バンド取付けが可能としてある。柱自体の振動時応力レベルは高くないので溶接部や碇着部を補強し疲労対策とした。但し碇着ボルトは既設であったため補強はしていない。

5. 設置後の状況と点検時の留意事項

八角柱は昭和59年11月中旬に建込みを始めたが、同月末のチェーンダンパ装着までの間は顕著な振動が見られた。それ以後は注視、手による感触、もしくは耳を当てるかしないと振動は認められない。状況はチェーンの衝突音が聞え始めると減衰し概ね停止する。これが繰り返されている。（耳を当ないと聞えない）

丸型柱では、灯器側からの強風（面内方向、約 15m/sec 以上）時に大きな首振りが生ずる他は目視などで判るような振動は確認されていない。首振り振動は灯器箱の渦励振と思われ振動モードは面内2（ $f=3.0\text{Hz}$ ）又は1次（ $f=1.1\text{Hz}$ ）と目される。今、2次モードで全振巾を箱高の $1/4$ と仮定すると灯器の加速度及び基部モーメントはそれぞれ 1.5 及び $0.4\text{tf}\cdot\text{m}$ になる。すぐ支障を来すとは思えないが注意深く見てゆく必要

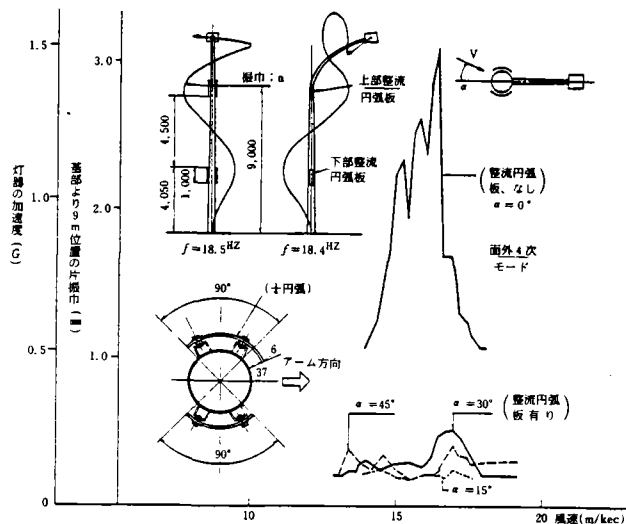


図-6 丸型テーバー柱整流板の効果

がある。

点検事項は、強風時には目視、触感により振動の状況を調査したい。通常点検時には灯器、柱溶接部、碇着ボルト及びベースコンクリー面などの異常をチェックする。

6. あとがき

八角柱は丸型柱に比し剛性の面で優れるが重量、風荷重共2.5倍に近い。現時点から考察するに大鳴門橋区間は丸型柱では行き詰まるようで心もとない。但し、振動特性は良好で灯器の空力特性を改善し剛性及びマス分布に配慮すれば他の強風地域なら十分対応可能なものになると思われる。

おわりに、本検討は「海峡部道路照明設備製作据付工事」の一環をなすもので、諸資料は文献5)に集録してある。短期間に一つの成案を見たのは関係者の努力による所が大きい。殊に九州産業大学吉村助教授には風洞試験の実施をはじめ貴重な御意見をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄塔構造基準 昭和47年第1版・第4刷 6ページ
- 2) 砂本・藤原：ボルトの疲れ強サ，三菱重工技報 Vol. 3, No 2
- 3) 辻松雄：構造力学的耐風制振対策 日本風工学会誌第20号 昭和59年6月
- 4) W. H. Reed III: Hanging Chain Impact Dampers: A Simple Method for Damping Tall Slender Structures, Wind Effects on Buildings and Structures, Univ. of Toronto Press, 1968.
- 5) 本州四国連絡橋公団：海峡部道路照明設備製作据付工事 実験報告書，昭和60年3月。