

振動する鋼管柱の制振対策について

構 造 研 究 室

1. はじめに

道路には、運転をしやすくするためのさまざまな標識や照明柱などがあり、そのほとんどが鋼管製の柱で構成されている。それらの標識は常に風にさらされ、ときには風によって振動している。その振動が鋼管を疲労させて破損させる原因となる場合があり、そのため制振対策が必要となってくる。制振対策には、NASA のロケット打上げ装置の制振用に開発されたチェーンダンパや鋼管にワイヤーを巻きつけるなどの方法があるが、今回の実験では、その他の有効と思われるいくつかの方法について振動試験を行い、鋼管柱の減衰を調べた。

2. 鋼管柱の振動による疲労破壊

写真-1～3は、風によって折損したスノーポールである。このスノーポールは、海岸沿いに設置しており、そのまわりには建築物がなく、非常に風の影響を受けやすい状況にあった。

現地での調査および計測によると、スノーポールは風速 8.5 m/s で道路軸と直角方向に細かく振動しており、またそれ以外の風速では振動していなかった。現地での風の状態は、稀にみる一様かつ定常的な流れであった。

この計測によりレイノルズ数は、風速 8.5 m/s、円柱 $\phi 114$ mm に対して、

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} = \frac{8.5 \times 0.114}{1.46 \times 10^{-6}} = 6.6 \times 10^4$$

(Re: レイノルズ数, U: 風速,
D: 円柱直径, ν : 動粘性係数)

と計算される。



写真-1 腕木の折れたスノーポール

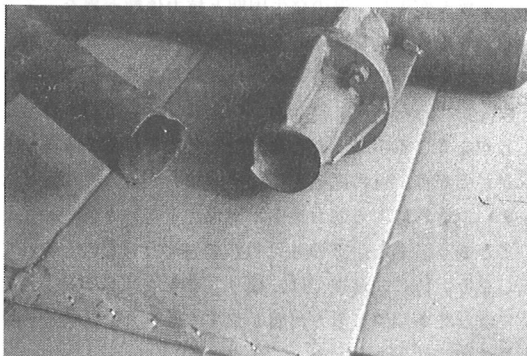


写真-2 折 損 部 分

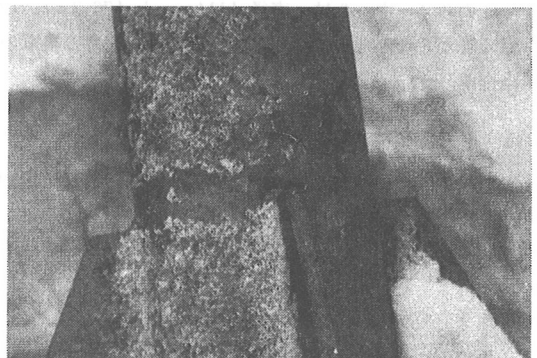


写真-3 リブの溶接付近の破損

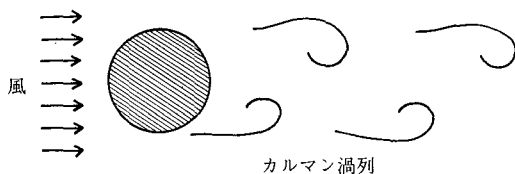


図-1 カルマン渦列の発生

レイノルズ数が $300 < Re < 3.8 \times 10^5$ では、円形断面の物体は次のような状態になることが知られている。

一定流の空気が鋼管にあたると、空気は左右表面に沿って流れる。ところが、その空気流は管表面の粗さや流れの速度のために管後方で流線形的に交わらないで、管表面のある点で剝離して渦をつくる。この渦は管の左右表面から規則的に生じ、後方に図-1 のような渦の列が作りだされる。これがカルマン渦列と呼ばれるものである。そして、このカルマン渦が流体中に放出されるとに物体周辺の空気循環の方向が変化し、これによって流れ直角方向に交互に交番揚力が生まれ振動し始めることになる。

これらのことから、このスノーボールは次のような過程で破壊したものと考えられる。すなわち、空気流によって発生した交番揚力の振動数と物体の固有振動数が一致すると、この風速付近で物体は流れ直角方向の振動を励起される。この振動が長時間続くと、スノーボールの特に断面変化の大きい部分に交番曲げ応力が集中する。そして、その交番曲げ応力によって、疲労による破壊が起きることになる。

左右一対のカルマン渦の発生周期 f と風速 U 、物体の厚さ D との関係は実験的に $f = St \cdot U/D$ となることが知られている。式中にある物体の形状に固有な無次元ストローハル数 St は、 $Re = 500 \sim 100,000$ ならば大体 0.2 前後である。

このスノーボールは、直径 $\phi 114 \text{ mm}$ と $\phi 76.3 \text{ mm}$ の 2 つの管からなりたっているので、単位長さ当たり換算の直径を、

$$D = \frac{(6500 \times 0.114 + 3275 \times 0.0763)}{(3275 + 6500)} = 0.1014 \text{ m}$$

として、同式を適用してみると、カルマン渦の発生周期は、

$$f = 0.2 \times \frac{8.5}{0.1014} = 16.8 \text{ Hz}$$

となる。

次に、このスノーボールの固有振動数およびモード図を求めてみると、表-1、図-2 のように算出される。

このことから、支柱の面内 3 次モードの固有振動数と

表-1 スノーボールの固有振動数

振動モード		固有振動数(理論値)	固有振動数(実測値)	減衰定数
面外	1 次	2.02 (Hz)	1.6 *	0.00782 *
	2 次	5.15	5.0 *	0.00196 *
	3 次	16.47	14.0	0.00748
面内	1 次	2.02	1.6	0.00168
	2 次	5.88	5.1	0.00075
	3 次	16.48	15.0	0.00525

(注) * は他のモードが交わり合ったので、やや不明瞭な値である。

カルマン渦の発生周期はほぼ一致するのがわかった。したがって、このスノーボールはカルマン渦列により振動していることが明らかになった。

また、現地での調査の結果、スノーボールに雪氷が付着しているものがあつた。このことは、スノーボールが雪氷付着によって断面が長円状になるので、ギャロッピングを多少起こしているのではないかと考えられる。

3. 鋼管柱の制振対策

鋼管柱の振動による疲労破壊対策には、以下のことが考えられる。

- (1) カルマン渦による揚力の発生周期や位相を乱す。
- (2) 減衰を増すような装置をつける。
- (3) 固有振動数を高くする。
- (4) 応力集中をなくする。

● カルマン渦による揚力の発生周期や位相を乱す。

カルマン渦の発生周期や位相を乱すには、図-3, 4 のように管の一部表面にワイヤーを巻きつけたり、縦リブをつけたりする方法がある。この方法で、制振対策に成功した例として、トラス橋の四徳大橋がある。

鋼管柱の一部にワイヤーや縦リブをつけるとストローハル数が変化し、渦の発生周期と抗力係数が異なってくる。つまり、縦リブのある部分とない部分においては、渦が柱を押すにしても異なった周期になり、従来のように全長にわたって一様な力、一定のリズムで押されることがなくなるので、有害な振動が発生しにくくなる。しかしながら、風の抵抗を受けると抗力が大きくなってしまい、それによる応力集中が増大するという欠点が生じてしまう。また、その外見も好ましくないものとなってしまう。特に北海道では、縦リブなどを取りつけることによって冬期間に雪が付着しやすくなり、サビの原因となる可能性がある。

● 減衰を増すような装置をつける。

鋼管柱の制振対策に開発された装置に、チェーンダン

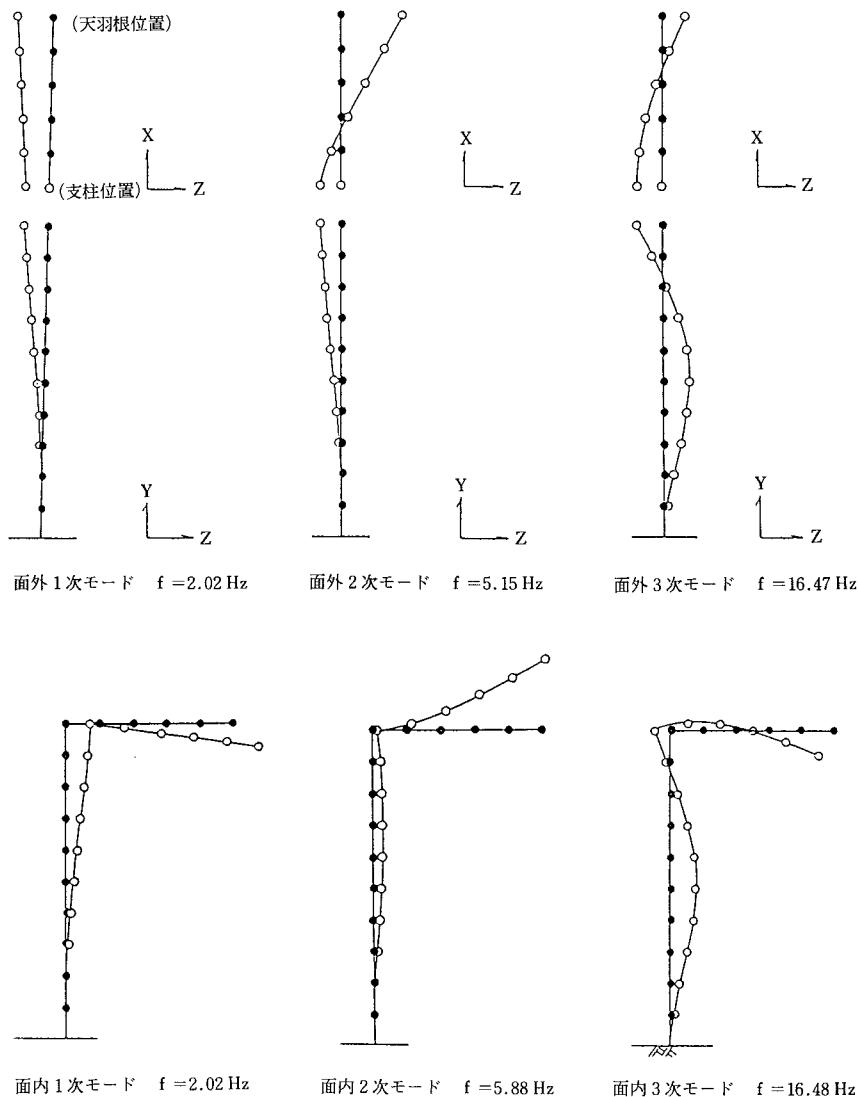


図-2 スノーポールの固有振動モード図

バがある。これは、図-5に示すように鋼管内にチェーンを吊下げて、管が大きく振動するたびに管内にぶつかり減衰させるものである。この装置と同じ原理のものが大鳴門橋や瀬戸大橋、北海道では札幌大橋の照明柱に採用されている。大鳴門橋と瀬戸大橋では、それぞれ上方にチェーン長1mのものが2本取り付けられている。札幌大橋では、照明柱内部に振子を利用した制振装置が装着されている。

構造研究室では、図-6のように、このほかに鋼管内に砂を詰める方法やチェーンにいくつかの質点をつける方法も有効ではないかと考え、実験によりそれらの方法に

よる鋼管柱の減衰定数を調べた。実験方法は鋼管柱に8つの条件で、10 Kgf と 5 Kgf で引張って切りはなすという簡単な方法で行った。その結果を表-2に示す。それによると、なにもつけない鋼管を振動させた場合、ほとんど減衰しなかった。つまり、一度振動し始めると、鋼管に交番応力がいつまでも作用し続けることになる。

鋼管に砂を詰めた場合も、減衰定数はほとんど変化しなかった。このことは、鋼管に砂が詰められても、その砂は鋼管の振動になんら影響を及ぼさないことを示している。

チェーンダンパを装着のときは、減衰定数が自由振動

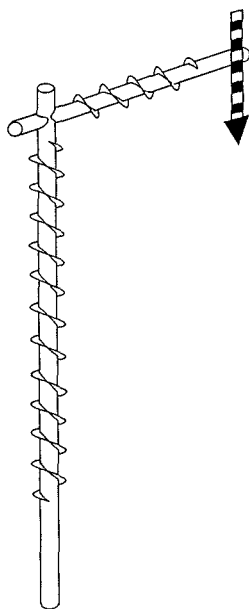


図-3 ワイヤー装着

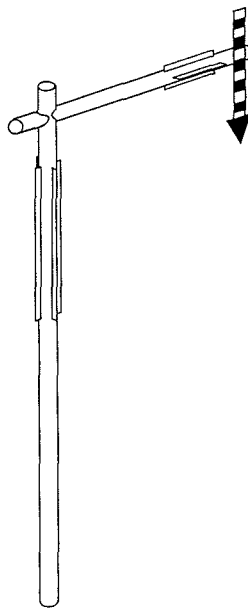


図-4 リブ装着

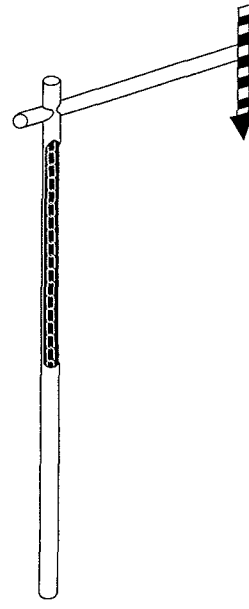
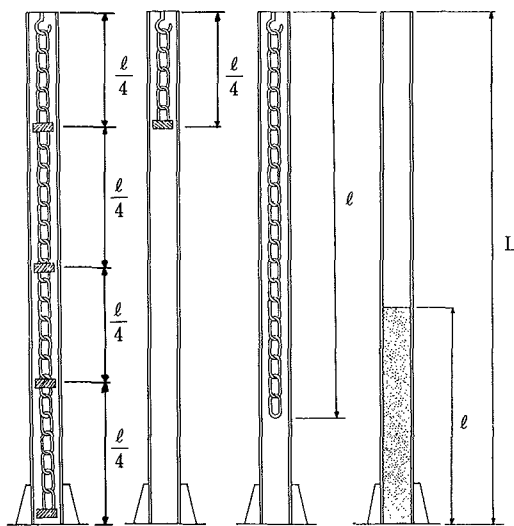


図-5 チェーンダンパ装着



質点付チェーンダンパ チェーンダンパ 砂ずめ

図-6 モデルケース

のときと比べて約5倍の値を示した。よって、チェーンダンパは減衰に有効な手段であることがわかる。また、このチェーンダンパに4つの質点を取りつけて振動させてみたところ、自由振動のときよりも10倍の減衰が確認

表-2 各モデルの減衰定数

	条 件	減 衰 定 数	
		5 kgf の引張り	10 kgf の引張り
1	自由振動	0.005	0.004
2	チェーンダンパ $L=3500$	0.024	0.026
3	チェーンダンパ $L/4=875$	0.015	0.027
4	おもり付チェーンダンパ $L=3500$ 4質点	0.044	0.051
5	おもり付チェーンダンパ $L=875$ 1質点	0.004	0.016
6	テグスで吊るした4質点 のみのダンパ	0.032	0.028
7	砂ずめ $L/2=1750$	—	0.008
8	砂ずめ $L=3500$	—	0.006

された。この質点を取りつけることによって非常に減衰効果が増すことから、その性質を調べるために質点をテグスで吊るした質点のみのダンパを用いてみた。そうしたところ、自由振動に対して約6～7倍の減衰効果を得た。このことから、鋼管柱全体にダンパを取りつけてなくても、効果的な位置に適当なダンパを取りつけるだけで、十分な制振効果があることがわかった。

大鳴門橋の場合、照明柱外装に上端と中間位置にチェーンダンパが取り付けられるような構造になっているが

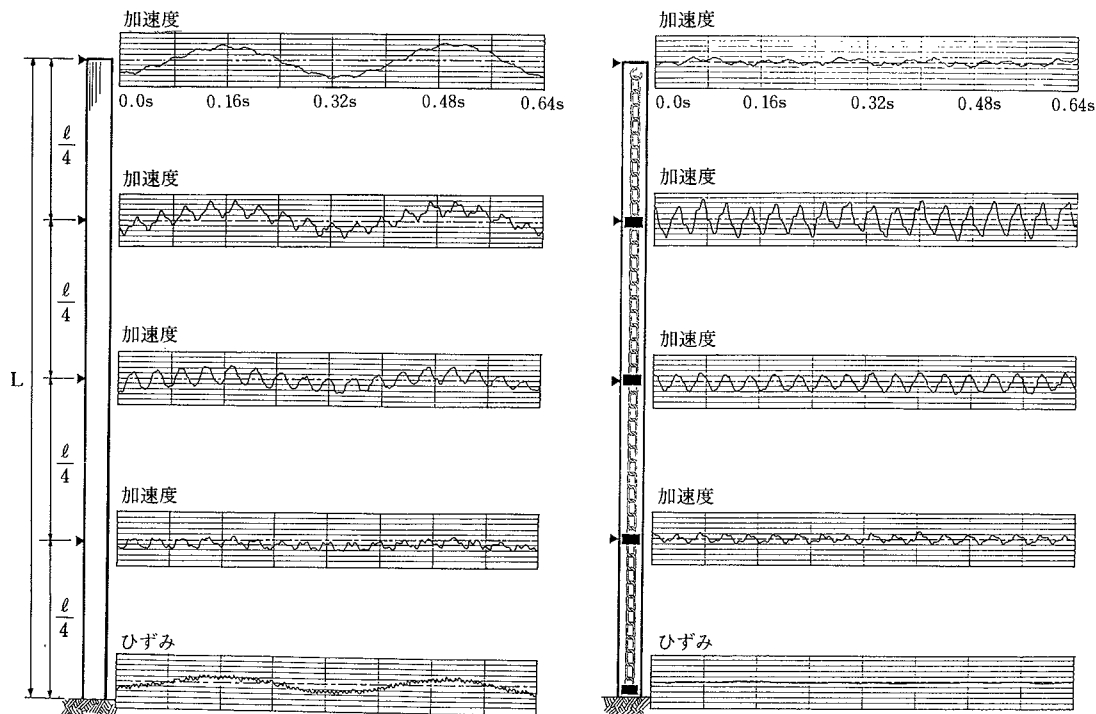


図-7 チェーンダンパの有無による加速度・ひずみの波形
(▶：加速度計)

北海道の場合、冬期間においてその部分に雪氷の付着による腐食などが考えられるため、その内部に取りつけられるようなものが望ましい。

図-7は、なにも装着していない鋼管柱と質点つきのチェーンダンパを装着した鋼管柱を1次の固有振動数で一定時間ゆらしたときの加速度とひずみの波形である。両者を見比べてみると、明らかに後者の方の1次モードが小さくなっている。それに伴い、ひずみもほとんど消滅している。したがってダンパは定常的な風力による振動に対しても大きな制振効果があることがわかった。また、チェーンダンパを取りつける際に気にかかるのはチェーンが鋼管にあたったときの衝撃音であるが、それはチェーンにゴムチューブを覆うことによって解決できる。

●固有振動数を高くする。

風による交番応力は、渦の発生周期と物体の固有振動数が一致するとき、最も大きな値となる。したがって、管の径を変え固有振動数を高くすることによってカルマン渦との共振を避けるのである。

スノーボールの折損を起こした現場では、管径をφ114からφ140に変更して対処した。その結果、現場での折損事故は発生しなくなった。

●大きな断面変化のない構造にする。

スノーボールの折損事故が起きた位置は、いずれも断面変化の大きなリブ溶接付近であった。したがって、この部分の断面変化を小さくするような構造にするのがよい(図-8)。

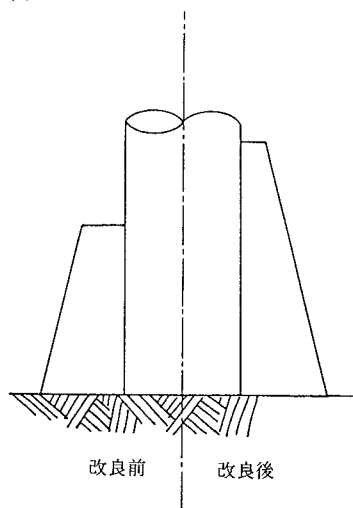


図-8 リブ改良案

4. おわりに

スノーボールなどの鋼管で構成されている標識は、北海道全域に設置されている。その中で、風により完全に折損したものはあまり多くはないが、それらは、わずかながらでも常に振動しているのは確かである。これらの標識は、設計上では風速 50 m/s 時の瞬間的な抗力に耐え得るようになっているが、今まで述べてきたようにたとえ風速がそれほど速くなくてもカルマン渦列による疲労破壊が発生する可能性が考えられる。このことから今後カルマン渦列の影響を考慮した設計法を検討すべきではないかと思われる。

(文責 城ヶ端政次)

参考文献

- 1) 構造研究室; 稚内メグマ地区 スノーボール振動性状調査及び制振対策報告書, 昭和 63 年 4 月.
- 2) 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, 1988 年 10 月.
- 3) 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, 1988 年 10 月.
- 4) 岡内 功, 伊藤 學, 宮田利雄; 耐風構造, 丸善株式会社, 昭和 52 年 5 月.
- 5) 土木学会; 振動便覧.

*

*

*