

潮流海域における浮遊式鋼管構造物および海底パイプ ライン等に作用する振動力について

山 本 諄*・関 田 欣 治**

1. 概 要

海底パイプラインやパイプ敷設の一工法であるレイバージ工法に用いるスティンガー等の浮遊鋼管構造物が、それらの後流域に発生したカルマン渦列によって周期的振動力を受けるといわれている。本報告ではポテンシャル論により外力の大きさ、その周期を明確にし、あわせて鉛直方向の周期的揚力についての各種の模型実験を行った結果を示す。

2. 理論解析

図-1 に示すように交互の渦列のポテンシャルから Blasius の公式を用いて、 x 方向力、 y 方向力を求めると

$$X/\rho = \Gamma^2/2\pi l - h\Gamma V/l, \quad Y/\rho = \Gamma V/2 \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 ρ は流体の密度、 Γ は渦の強度、 h 、 l は渦の間隔、

$$V = -T/2l \tanh(\pi h/l) \quad \cdots \cdots (2)$$

は渦列の前進速度である。したがって物体は $U-V$ の速度で前進し、それに伴って単位時間に $(U-V)/l$ の新たな渦列が発生する。すなわち渦の発生振動数 f_s として

$$f_s = (U-V)/l \quad \cdots \cdots (3)$$

一方、ストラハル数との関係を示すと

$$f_s = SU/D, \quad T = 1/f_s \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、Kármán の渦列の安定条件¹⁾

$$\cosh \pi h/l = \sqrt{2}, \quad V = \Gamma/2 \sqrt{2}l \quad \cdots \cdots (5)$$

を用いて、式(1)は次式のように表わされる。

$$X = \frac{1}{2} \rho C_D DU^2 \quad \cdots \cdots (6)$$

$$Y = \frac{1}{2} \rho C_L DU^2 \quad \cdots \cdots (7)$$

ただし、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L は次式で与えられる。

$$C_D = 3.4M(1 - SM/0.281)^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

$$C_L = 10.1M(1 - SM/0.281)^2 \quad \cdots \cdots (9)$$

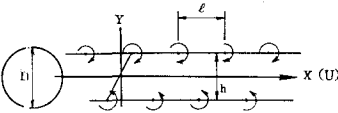


図-1 後流中の渦列

なお、上式の M は Roshko²⁾ によって与えられた bluff-ratio であり、図-1 における渦列と物体の比 (h/D) を示している。また、揚力係数はほぼ抗力係数の3倍にあたるのが式(8)、(9)からわかる。式(9)について表示したのが図-2であり、 S の増加、 M の増加に伴い C_L は減少する。一方、ストラハル数はレイノルズ数との関係として Thom や板谷ら³⁾ によって、図-3 の関係が得られている。ここで M は $1.0^2) に近く、式(9)と図-3 から、図-4 に示すような関係が推測される。$

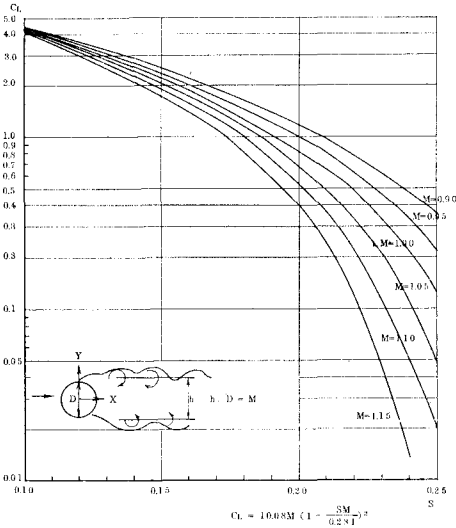


図-2 C_L の理論値

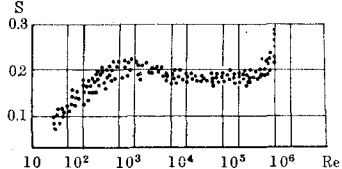


図-3 ストラハル数とレイノルズ数

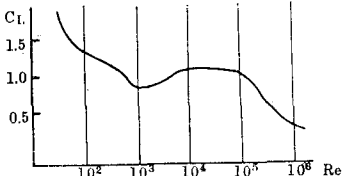


図-4 C_L とレイノルズ数

* 正会員 新日本製鉄相模原技術センター海洋グループ
** 正会員 新日本製鉄相模原技術センター海洋グループ

また、楕円形物体はカルマン渦に対して安定といわれるが揚力を受けると鉛直方向に移動し、図-5のように物体に作用する潮流の方向は変動し、その結果後流域は拡がり、bluff-ratio M も増大する。したがって式(9)に示す関係から C_L は小さな値を持ち比較的安定していると説明される。以上 M は揚力係数を決定する非常に重要な量と思われる。

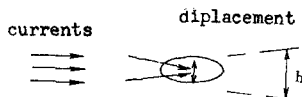


図-5 楕円物体

3. 実験

実験としては外力の大きい揚力についてのみ測定を行った。

(1) 実験装置

実験装置は水槽(5m×6m×10m)中を図-6に示すような供試体を載せた試験台車を等速度で、H型鋼からなるガイドレール上をけん引して相対的に潮流を供試体に作用させたと考え、その時供試体の両端支点のひずみを測りオシログラフに出力させ、力の大きさ周期波形を記録した。

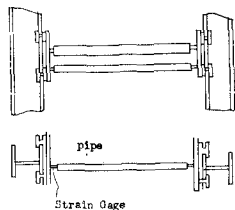


図-6 装置

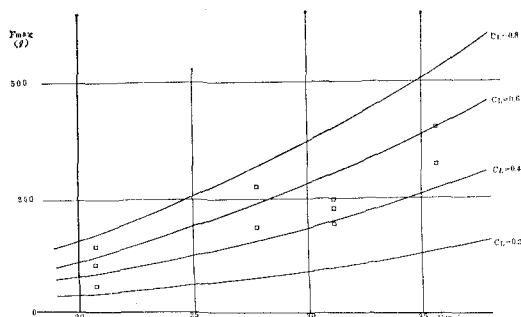
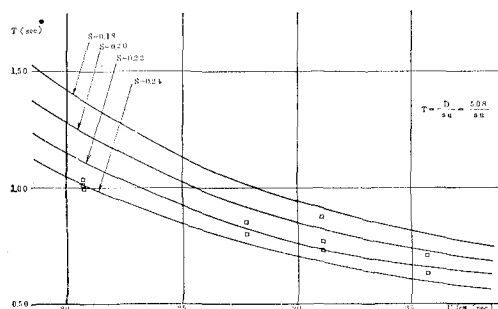
(2) 供試体

供試体としては表-1に示すようにパイプ単体、キールタイプスティンガー、トラスタイプスティンガー、さらにパイプを内在したスティンガーおよびトリップワイヤを巻いたパイプである。

4. 実験結果

(1) 単体パイプ

単体パイプの揚力、周期を図-7に示すが、式(4)、(7)に比較的一致し $C_L \approx 0.5$, $S \approx 0.22$ である。また、この実験におけるレイノルズ数としては 10^4 のオーダーである。

図-7(1) $F-U$ 図-7(2) $T-U$

(2) キールタイプスティンガー

潮流に対して前面パイプ、後面パイプの揚力係数 C_L は後面パイプの方が大きく、 d/D によって異なり、その関係を図-8に示す。

(3) トラスタイプスティンガー

これらのスティンガーの揚力係数、ストラハル数の平均値を表-2に示す。一般に上弦、下弦パイプとも、上

表-1 供試体

Test Specimen	a piece of pipe	a keeled stinger	a trussed stinger	a trussed stinger with a pipe inside	a pipe coiled a trip wire
Sectional figure					
Dimension (length 2.0 m)	$D = 50.8 \text{ mm}$	$d/D = 3.5, 3.0, 2.0, 1.5$ $D = 50.8 \text{ mm}$	$1/9 A_1, 1/18 A_1$ $h_1 = 23 \text{ mm}$ $h_2 = 280$ $D_1 = 101.6$ $D_2 = 50.8$	$A h_3 = 65 \text{ mm}$ $D_3 = 56.4 \text{ mm}$ $h_3 = 530 \text{ mm}$ $D_3 = 34.0 \text{ mm}$	$d/D = 1.0, 0.75, 0.5$ Dia of wire $\phi = 2.0, 1.5, 1.0 \text{ mm}$

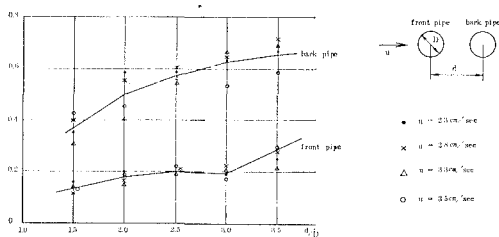


図-8 C_L - d/D

表-2 C_L の平均値

	Mean C_L	Mean S
trussed stinger 1/9	0.56, 0.62 0.32, 0.44	0.17, 0.1 0.32, 0.32
trussed stinger 1/18	0.35, 0.63 0.31, 0.40	0.16, 0.1 0.20, 0.21
stinger pipe A inside	0.36, 0.45 0.32, 0.44	0.25, 0.25 0.22, 0.32
stinger pipe B inside	0.4, 0.5 0.24, 0.31	0.21, 0.15 0.20, 0.20

流側のパイプに作用する揚力係数より、下流側パイプに作用する揚力係数の方が上弦パイプで、約1.8倍、下弦パイプで1.35倍ほど大きい。また、パイプを内在する場合その揚力係数の相違は同様であるが、パイプのない場合ほど顕著でない。他方ストラル数については同径パイプでは、ほぼ一致しているが上弦材、下弦材、パイプを内在する場合にはそれぞれ異なっている。

(4) トリップワイヤによる遮減効果

トリップワイヤ径をパラメーターとして、裸パイプの揚力係数 C_{L0} に対するトリップワイヤを巻いた場合の揚力係数 C_L の比 δ を図-9に示したが、ワイヤ径 ϕ にはあまり関係なく、巻く密度 l/D が増加すれば比較的效果あることが見出せる。

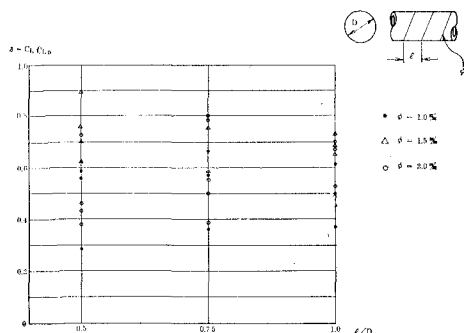


図-9 遮減効果

5. 考 察

(1) パイプ単体

実験値の揚力係数 C_L とストラル数 S を式 (9) の理論曲線上にプロットしたのが 図-10 に示すような結果である。ばらつきは多少あるが bluff-ratio M の値 0.95 近辺に分布している。この実験のレイノルズ数は $7.3 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$ の範囲にあり、流れの状態としては遷移領域で 図-10 に示すごとく、はく離点 (stripping points) がパイプの後方にずれ、層流や乱流状態と異なり、後流域の幅が狭い。したがって $h/D (=M)$ は 1.0 より小さい値をとるものと思われる。

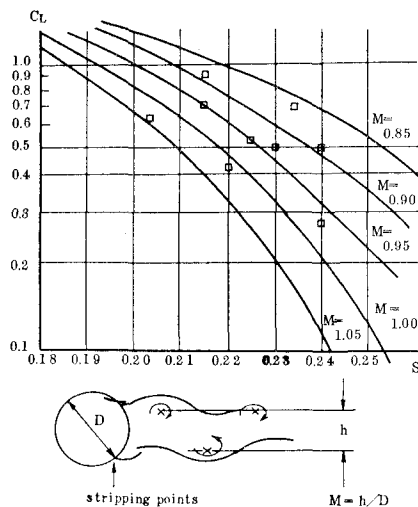


図-10 実験値との比較

(2) キールタイプスティンガー

前面パイプ(上流側)の揚力係数が小さいことは前面パイプには渦の運動量変化の伝達が後面パイプによって、遮蔽され、十分な揚力が生じないと思われる。一方 d/D 値が大きくなれば、前面パイプの後流域にも渦列が発達し前面パイプの揚力係数も大きくなるとと思われる。

(3) トラスタイプスティンガー

上弦材間では d/D が 2.7、下弦材間では d/D が 5.5 であり、その場合のキールタイプでの実験値に比較して、上流側、後流側の揚力係数の相違ほど顕著でない。さらにパイプを内在するスティンガーでは、後流域の渦列が偏向したり、複雑な様相を示していると思われる。

(4) トリップワイヤによる遮減効果

トリップワイヤによる揚力係数の遮減は式 (9) に沿って、図-11 に裸パイプ (図中では □ 印) に比較して表示した。それによるとトリップワイヤの密度を増せば bluff-ratio M が増加し、その結果として C_L は減少し遮減効果が生じるとと思われる。この M が増大することは遷移領域にあったはく離点を乱し、渦列の幅を広げるこ

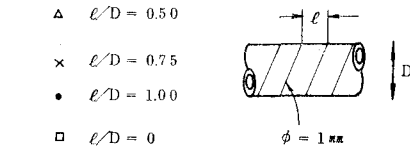
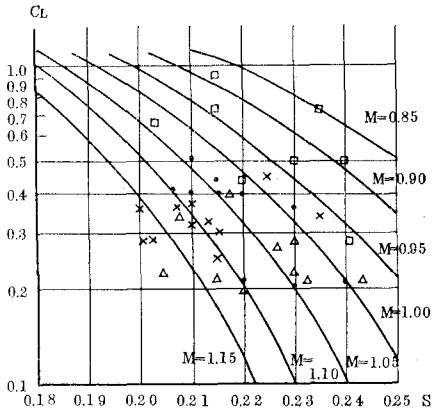


図11 トリップワイヤを巻いた場合

とであり、結果的に揚力係数が減少すると思われる。

6. 結 論

揚力係数について、パイプ単体の場合ストラハル数 S , bluff-ratio M を用いて式(9)を誘導し、実験値と比較しかなり傾向が一致しており、レイノルズ数と bluff-ratio の関係がわかれば、式(9)を用いて揚力係数が算定できると思われる。スティンガーについても同式(9)を用いて傾向を類推できると思われる。また、トリップワイヤによる揚力の遁減効果はパイプ後流域のはく離点を乱し、渦列の幅を広げることによって起こると思われる。

参 考 文 献

- 1) von Kármán, T.: Gott Nach-Math-Phys Klass pp. 501-517 (1911)
- 2) Anatol Roshko: National Advisory Committee for Aeronautics teche. note 3169
- 3) Thom, A.: Proceeding Royal Society (London) Series A, Vol. 141, 1933 pp. 651-669