

海底パイプラインに作用する波力について（その1）

長崎 作治*・尾形 賢**

1. 概 要

長距離パイプラインの設計・施工にさいし作用波力の算定は重要な問題である。

深海波は通常正弦波であるが海底面を感じた浅海における波は複雑な波形をもち、その限高波高は水深と関係する。よって海底面におかれたパイプに作用する波力も複雑で理論計算値とかなり異なった力が作用するものと思われる。

本文は水平水粒子速度による抗力、水平水粒子加速度による質量力、および揚力、ならびに以上3力がそれぞれ位相をもって作用すると考え、その理論計算値とモデルによる実測値とを比較検討したのでここに報告する。

2. パイプに作用する波力（理論値）

流れの中におかれた物体に作用する力は一般に式（1）で示される。

$$F = \frac{w_0}{2g} \cdot C_D \cdot u^2 \cdot A + \frac{w_0}{g} \cdot C_M \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot V \dots\dots (1)$$

w_0 : 流体の単位体積重量, u : 流体の速度, $\partial u / \partial t$: 流体の加速度, A : 流れに直角方向の物体の射影面積, V : 物体の体積

式（1）の第1項は流れの速度の2乗に比例する力である抗力, 第2項は流れの加速度に比例する質量力である。

C_D, C_M は抗力, 質量力係数でレイノルズ数に關係する。パイプに作用する波力についても同様に考え、流れの速度 u および加速度 $\partial u / \partial t$ をそれぞれ水粒子の軌道速度および加速度とみ、今回は微小振幅波理論から H/L の一定範囲で理論波力の計算値を $C_D=1, C_M=1, C_U=1$ として次式から求めた。

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh 2\pi \frac{z}{L}}{\sinh 2\pi \frac{h}{L}} \cdot \sin \theta \dots\dots (2)$$

$$\partial u / \partial t = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \cdot \frac{\cosh 2\pi \frac{z}{L}}{\sinh 2\pi \frac{h}{L}} \cdot \cos \theta \dots\dots (3)$$

質量力は位相差 θ で抗力より 45° 先行するからその最大合力は式（7）、（8）から求まる。

抗力 $F_D = \frac{w_0}{2g} \cdot C_D \cdot u^2 \cdot A \dots\dots (4)$

質量力 $F_M = \frac{w_0}{g} \cdot C_M \cdot \partial u / \partial t \cdot V \dots\dots (5)$

合力 $F = F_D |\sin \theta| \sin \theta + F_M \cos \theta \dots\dots (6)$

$F_M < 1 F_D$ のとき $\theta = \cos^{-1} \frac{F_M}{2 F_D}$

$F_{\max} = F_D + \frac{F_M^2}{4 F_D} \dots\dots (7)$

$F_M \geq 2 F_D$ のとき $\theta = 0$

$F_{\max} = F_M \dots\dots (8)$

揚力 $F_U = \frac{w_0}{2g} \cdot C_U \cdot u^2 \cdot A \dots\dots (9)$

なお揚力は水平方向水粒子速度のみによる力を理論揚力値と想定し式（9）から計算値を求め、モデルによる実測値と比較検討した。

表-1 海象条件

工事名	地域	海底管 外径 (cm)	全長 (m)	水深 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	潮流 (knot)
京葉シーバース 海底原油管布設	千葉県 姉ヶ崎 沖合	121	7,642	30 ~10	12	3.0	1.5
扇島石油基地海 底原油輸送管	川崎市 扇島沖 合	100	3,896	20 ~5	7	2.0	
扇島シーバース 海底原油輸送管	"	100	3,867	20 ~5	7	2.0	
西部石油海底原 油輸送管	宇都港 沖合	100	11,000	25 ~5	10	2.0	2.0
秋田沖海底管	秋田県 道沖沖	20	20,000	80 ~0	13	9.0	
海南海底管	海南港 港外	100	3,600	21 ~5	9	2.5	

表-2 実験条件

項目	設定条件	縮尺	模 型
水 深 (h)	80 m	1/200	40 cm
波 高 (H)	0~10 m	1/200	0~5.0 cm
周 期 (T)	8~28 sec	1/√200	0.6~2.0 sec
パイプ外径 (D)	7600 mm	1/200	38 mm

* 正会員 東海大学教授 海洋学部海洋土木科

** 正会員 日本エンジニアリング海底管課

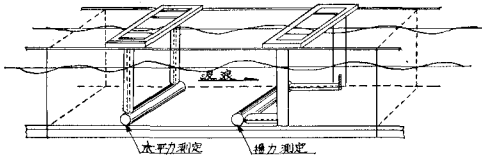


図-1 海底面上水槽中心軸に直角に置かれた長さ 80 cm のパイプに作用する波力測定装置図

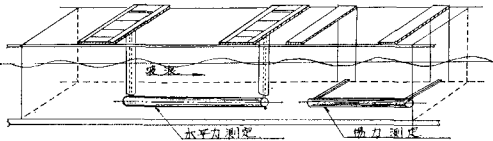


図-2 海底面上水槽と平行に置かれた長さ 3.6 m パイプに作用する波力測定装置図

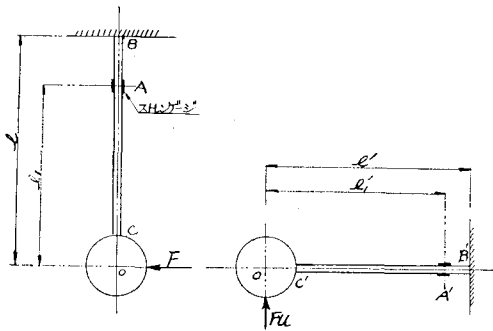


図-3 曲げひずみと波力

3. 実験方法と装置

(1) 海象条件

海底パイプラインは設置箇所によってその海象条件はまったく異なってくる。過去における海底パイプラインの設計時の海象条件は表-1 に示される通りである。よって現場条件を表-2 のごとく設定し、1/200 の縮尺モデルで実験することとした。

(2) 実験方法と装置

図-1、図-2 に示されるように、水槽中心軸に長さ 80 cm のパイプを直角においた場合と、水槽と平行に長さ 3.6 m のパイプをおいた場合について、パイプに作用する波力を水平力、揚力の 2 つに分け、それぞれのアームに取りつけたストレインゲージから曲げひずみをビジュグラフに記録させ、まえもって用意した校正グラフ、アームの変位とひずみの関係、アームに載荷する荷重とひずみの関係について測定し、両者の関係をグラフ化したものから作用波力を換算した。なお測定アームには直接波浪が作用しないようケーシングをとりつけておいた。また波高の測定には圧力変換式波高計を使用した。

(3) 測定資料の解析

a) 曲げひずみと波力

図-3 において 0 点に作用する波力 F と A 点の歪 ϵ_A

との関係は式 (10) で示される。

$$\epsilon_A = \frac{F \cdot l}{2.1 \cdot z} \quad \dots \dots \dots (10)$$

z : アームの断面係数。よって波力は位相角 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$ に対し、測

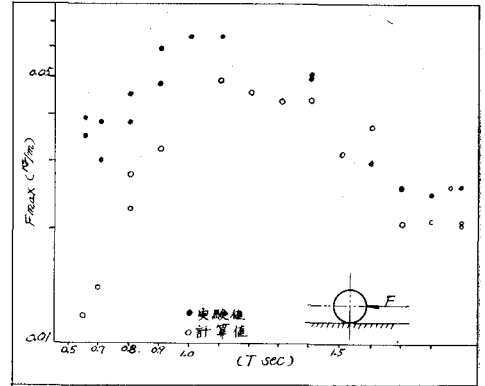


図-4 波の周期 (T) ~ 最大波力 (F)
(海底面上水槽中心軸に直角におかれたパイプ)

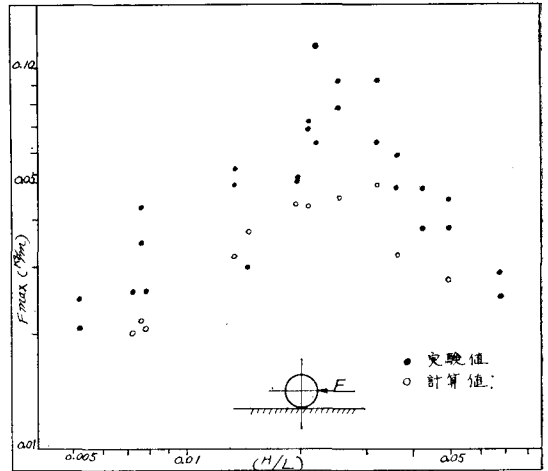


図-5 $H/L \sim F_{max}$

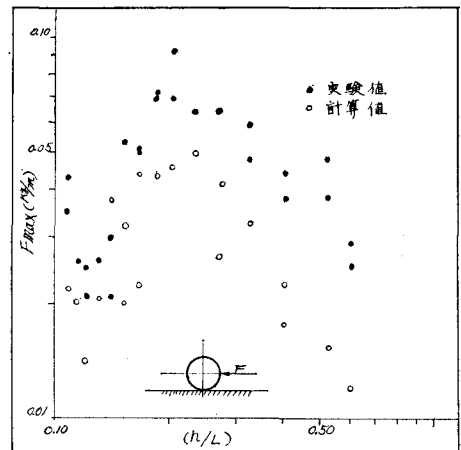


図-6 $h/L \sim F_{max}$

定ひずみから校正グラフによって換算できる。

b) 抗力, 質量力

抗力, 質量力は合力として測定された波力を分解して求めることとし, $F_M \geq 2 F_D$ の場合, $F_{\max} = F_M$ として位相から求めた。

$$F_{M, \max} = F_{\max} \quad \theta = 0^\circ, 180^\circ$$

$$F_{D, \max} = F_{\max} \quad \theta = 90^\circ, 270^\circ$$

(1) 水平力

作用波浪の周期 T (sec) と実測最大波力 F (kg/m) との関係を 図-4 に, 波形勾配 H/L と最大波力 $F_{\max}$ の関係を 図-5 に, 水深-波長比 h/L と最大波力 $F_{\max}$ との関係を 図-6 に示す。

(2) 抗力係数 C_D , 質量力係数 C_M

海底面上水槽中心軸に直角におかれたパイプに作用する実測最大波力時の波の位相は $180^\circ \sim 225^\circ$ であり, 波力の実測 (F_T) 値と理論計算値 (F_0) との比 C_f は表-3 にみられるように平均値 2.52 となり, 周期 $T=0.65 \sim 1.70$ sec の範囲ではかなり一致した。理論式からは,

表-3 海底面上水槽中心軸に直角におかれたパイプに作用する水平波力の理論計算値と実測値との比

波 浪 周 期 T (sec)	波 高 H (m)	理論計算 値(最大) F_0 (kg/m)	実 測 値 (最大)		理論計算値/実測値	
			位相角	F_T (kg/m)	F_T/F_0	平均 C_f
0.65	0.045	0.0109	225	0.033	3.03	2.94
			225	0.031	2.85	
0.70	0.032	0.0112	180	0.059	5.27	4.77
			225	0.048	4.29	
0.80	0.049	0.0277	180	0.064	2.31	2.31
			225	0.064	2.31	
0.90	0.044	0.0325	225	0.079	2.43	2.27
			225	0.069	1.12	
1.00	0.031	0.0263	225	0.075	2.85	3.57
			225	0.113	4.30	
1.10	0.054	0.0492	225	0.095	1.94	2.27
			225	0.106	2.60	
1.20	0.049	0.0459	135	0.100	2.17	2.07
			180	0.090	1.96	
1.30	0.046	0.0433	180	0.085	1.96	1.88
			180	0.074	1.71	
1.40	0.047	0.0437	135	0.079	1.81	1.91
			135	0.064	2.01	
1.50	0.035	0.0319	225	0.064	2.01	2.06
			225	0.066	2.07	
1.60	0.042	0.0372	225	0.052	1.40	1.39
			225	0.043	1.38	
1.70	0.024	0.0206	225	0.053	2.57	2.57
			225	0.053	2.57	
1.80	0.017	0.0142	225	0.050	3.52	3.02
			225	0.028	1.97	
1.90	0.025	0.0201	180	0.055	2.74	2.70
			225	0.053	2.65	
2.00	0.028	0.0218	180	0.050	2.30	2.16
			225	0.044	2.02	

全平均値=2.52

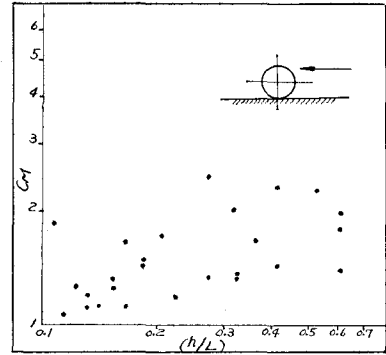


図-7 実測 C_M 値

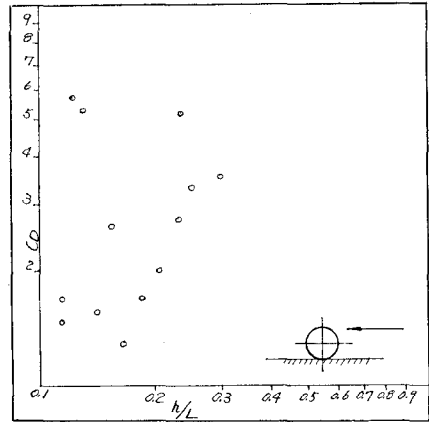


図-8 実測 C_D 値

$F_{\max} = F_M$ であるから, 実測値として求められた作用力から F_D と F_M は $F_M = F_{\max}$, $\theta = 0^\circ, 180^\circ$, $F_D = F_{\max}$, $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ として解析した。これより求めた C_M 値, C_D 値を 図-7, 図-8 に示す。なお C_D 値はかなり大きく, しかもバラツキがみられる。

(3) 揚力係数 C_U

水中におかれたパイプに作用する揚力 F_U はパイプのもつ断面積と水粒子の速度の 2 乗に比例する。今回の実験では水平方向の水粒子速度による抗力と揚力は海底面におかれた場合同一であると考え, $F_U = F_D$ と仮定した。その結果実測値と計算値との比はかなり大きかったが, 一応 F_U の実測値を 図-9 に, これより求めた C_U 値を 図-10 に示す。

以上の実験から

㊲ 円形柱体波圧理論は, 水平水粒子速度 u , 加速度 $\partial u / \partial t$, 抗力係数 C_D , 質量力係数 C_M によって十分適用できる。

㊲ 揚力についても同様に考えられるが揚力係数 C_U について再検討が必要である。

㊲ 海底面上水槽中心軸に直角におかれたパイプに作用する実測水平力とその理論計算値 (合力) との比は平

均して 2.52 であった。この場合抗力より質量力の方が大きく、波形の最高位置に一致し、最大波力は位相 0°, 180° に生じた。

質量力係数 C_M は $h/L=0.1\sim0.6$ の範囲で 1.0~2.5, 抗力係数 C_D は $h/L=0.1\sim0.3$ の範囲で 0.9~5.9 であった。

実測揚力はその理論計算値よりかなり小さかったので理論式などについて、再検討する必要がある。揚力係数 C_U は $h/L=0.1\sim0.6$ の範囲で 1.0~3.0 となった。

測定波力の最大値は $H/L=0.02\sim0.03$, $h/L=0.2$ に記録された。なおその前後はかなり小さい。

5. 海底面上水槽と平行におかれた長さ 3.6 m パイプに作用する波力

実測波力はパイプ両端のひずみ値から求めたが、パイプは波長とくらべ長くとった。図-11 に $H/L\sim F_{max}$ を示す。これより波長が長くなると波力は小さくなり、波力の変動は理論計算値と比較して少なかった。またパイプに直角に波力が作用する場合と比べ、平行方向に作用する波力は理論計算値よりかなり小さく、ほぼ 0.2~0.5 倍となった。なお h/L と実測揚力値 F_U との関係を図-12 に示す。

表-4 海底面上水槽と平行におかれたパイプの C_D, C_M, C_U 実測値

波 浪			実 測 値	
周 期 $T(sec)$	波 高 $H(m)$	波 長 $L(m)$	C_D	C_M
0.65	0.020	0.66	116.00	0.87
0.70	0.025	0.76	26.28	0.46
0.80	0.023	0.99	10.58	0.34
0.90	0.023	1.223	4.21	0.23
1.00	0.032	1.463	1.33	0.14
1.10	0.021	1.701		0.34
1.20	0.020	1.936	0.76	0.19
1.30	0.020	2.166	1.96	0.16
1.40	0.020	3.392	2.24	
1.50	0.019	2.615	2.47	0.24
1.60	0.037	2.835	0.52	0.15
1.70	0.024	3.053	1.35	0.20
1.80	0.022	3.482	1.44	0.39

波 浪			実 測 値
周 期 $T(sec)$	波 高 $H(m)$	波 長 $L(m)$	C_U
1.10	0.040	1.701	1.41
1.20	0.037	1.936	1.48
1.40	0.021	2.392	8.93
1.50	0.019	2.615	7.89
1.60	0.037	2.835	1.90

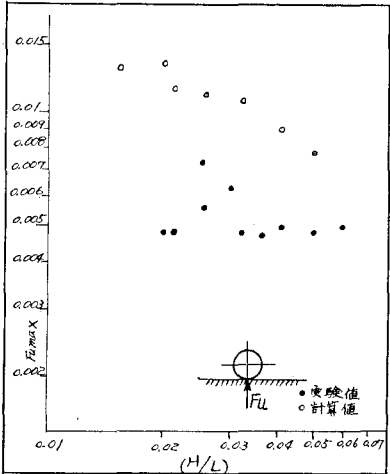


図-9 $H/L\sim F_{u\max}$

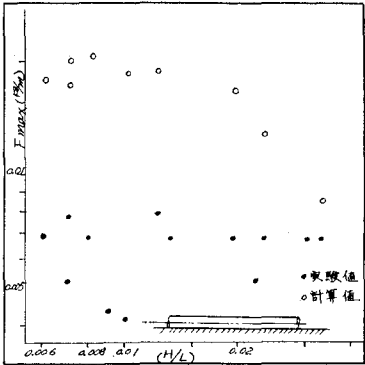


図-11 $H/L\sim F_{\max}$

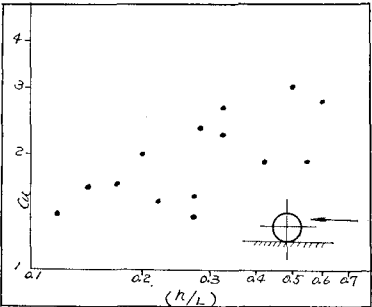


図-10 実験 C_u 値

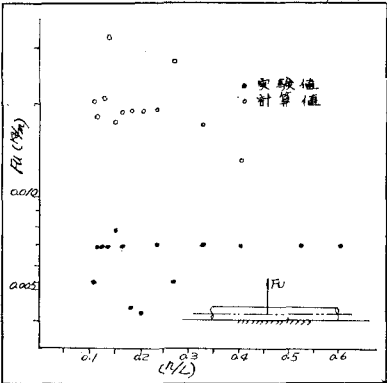


図-12 $h/L\sim F_{u,\max}$

またパイプの長さで波長比 l/L と実測波力と理論波力比との関係は $l/L < 2$ では実測波力は理論波力の 0.2 ~ 0.4, $l/L > 2$ では急激に大きくなり, $l/L > 5$ ではかなり大きな値となった。

C_D, C_M, C_U 値は表—4 に示されるようにばらついてるので再検討する方針である。

6. 結 言

今回のモデル実験では波浪周期とパイプの固有振動周期との共振, 波浪と測定ひずみ値との位相の遅れなど検討しなければならない問題点が残されているが, 実際の

パイプ布設時において, 8~13 sec の波とパイプの固有振動とが一致することが考えられるので, 防振, 安全係数等についても考慮する必要がある。引続き実験をかさね究明する方針とし, その第1回研究報告としたい。

参 考 文 献

- 1) 本間仁・石原藤次郎: 応用水理学上, 中II・丸善.
- 2) 港湾技術研究所: 海洋構造物に関する二, 三の問題
- 3) 合田良実: 構造物に作用する波力, 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会.
- 4) 土木学会: 水理公式集 (昭和38年増補改訂版)