

海底パイプラインに作用する波力・潮力について (その 2)

長崎 作治*・中村 幸司**・尾形 賢***

1. 概 要

海底パイプラインに作用する力は波浪の位相によって最大から最小値まで変動する。

よって、海底面におかれブリッジ状になったパイプラインに作用する水平・垂直方向の最大作用力とそれを生ずる位相との関係、さらに潮流（定常流）の作用力と流れとの関係、スポイラーでなくパイプの前後に障害物をおいた場合の影響について、その 1 に引き続きモデル実験を行ない究明したので、ここに報告する。

1. 実験方法と装置

(1) 海象条件

過去において布設した地域の海象条件から表—1 の条件を設定し、1:100 の縮尺模型で実験した。

表—1 実験条件

項 目	設定条件	縮 尺	模 型
水 深 (h)	40 m	1:100	40 cm
波 高 (H)	6~11 m	1:100	6~11 cm
周 期 (T)	8~13 sec	1: $\sqrt{100}$	0.8~1.3 sec
流 速 (u)	1.5~3.0 m/sec	1: $\sqrt{100}$	15~30 cm/sec
パイプ外径 (D)	3.4 m	1:100	34 mm

(2) 実験方法と装置

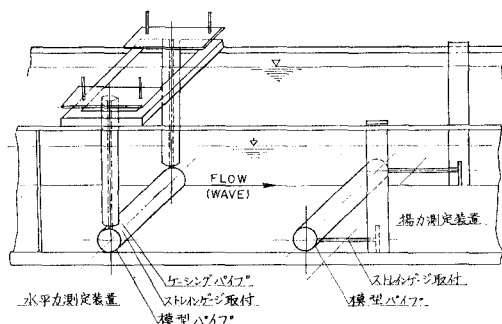
a) 水 槽

水槽は長さ 35 m, 幅 1 m, 水深 40 cm で周期 0.63~7 sec までの波浪を起こすことができる。

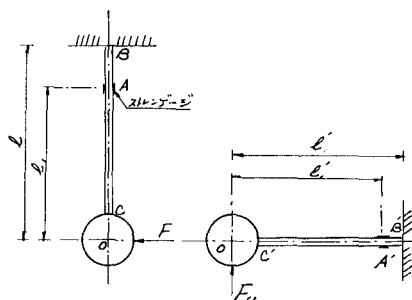
b) 測定要領

図—1, 図—2 に示されるように、水槽中心軸に直角におかれた長さ 80 cm, 外径 34 mm 銅管（底面上 4.9 cm 位置）に作用する波力・潮力を水平・垂直方向の 2 つに分け、それぞれのアームに取り付けたストレインゲージから曲げひずみをビジグラフに記録し、まえて用意した較正グラフから作用力を換算した。

波高とひずみ値とは記録された波形グラフ（パイプ上同位置においた波高計）から波長も参考して、最も良好と思われるものを採り、各位相（45° ずつ分割）につい



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



図—2 曲げひずみと波力

て読み取った。また流速計はパイプの前方に置き、流線はパイプ前方のビトー管から過マンガン酸カリウム溶液（赤色）を流し、写真から判定した。

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波力

(1) 水平方向の作用力と抗力係数、質量力係数

作用力は抗力 (F_D) と質量力 (F_M) の合力として記録される。よってその力を抗力と質量力とに分けた（その 1 パイプに作用する波力の項を参照）。理論式から、0°, 180°, 360° の各位相では水分子速度 (u) が 0 であるから抗力は 0, その位相における波力は質量力のみとなる。また 90°, 270° の位相では水分子加速度 ($\partial u / \partial t$) は 0 であるから質量力は 0, その位相における波力は抗力のみとなる。なお位相より抗力、質量力の最大値を読み、理論計算値との比から抗力係数 (C_D), 質量力係数 (C_M) を求めた。波形勾配 H/L と最大水平力 $F_{\max}$ (実測値・計算値) を図—3, 水深—波長比 h/L と最大水平力 (実測値・計算値) を図—4 に示す。

* 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 (株) 海底管課長

*** 正会員 日本エンジニアリング (株) 海底管課員

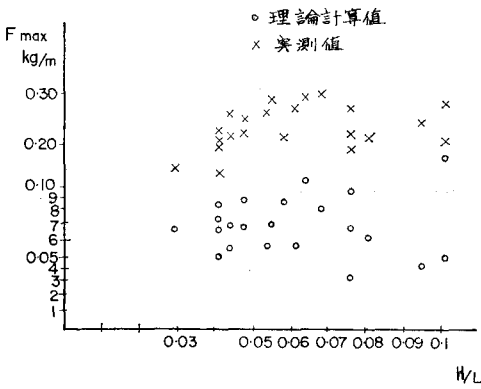


図-3 $H/L \sim F_{max}$

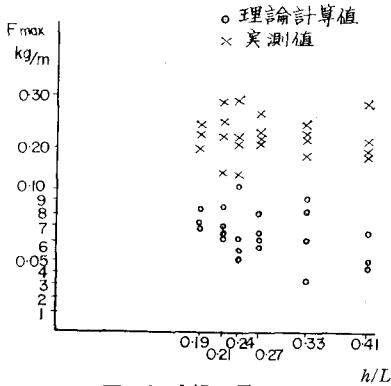


図-4 $h/L \sim F_{max}$

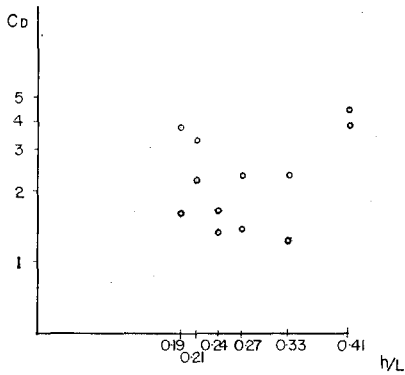


図-5 $h/L \sim C_D$

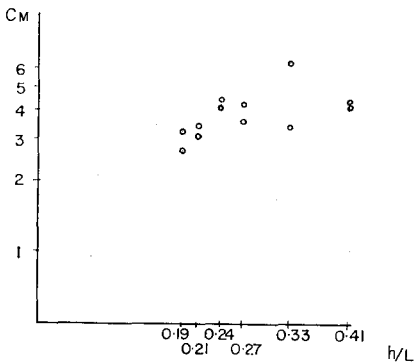


図-6 $h/L \sim C_M$

抗力係数 C_D は $H/L=0.0384 \sim 0.11$, $h/L=0.19 \sim 0.41$ の範囲で 1.31~4.71 となり平均 2.48 である。質量力係数 C_M は H/L , h/L の同範囲で、2.76~4.65 となり平均 3.91 である。 $h/L \sim C_D$ を 図-5, $h/L \sim C_M$ を 図-6 に示す。

(2) 揚力と揚力係数

揚力は垂直方向の水粒子運動によって生じ、 $F_U = F_D$ とみなした。理論値の最大揚力は 90° , 270° の位相であるが、実測では 135° , 315° の位相に現われ 45° のずれが認められた。 C_U は実測値の F_{Umax} と理論計算値の F_{Umax} との比から求めた。

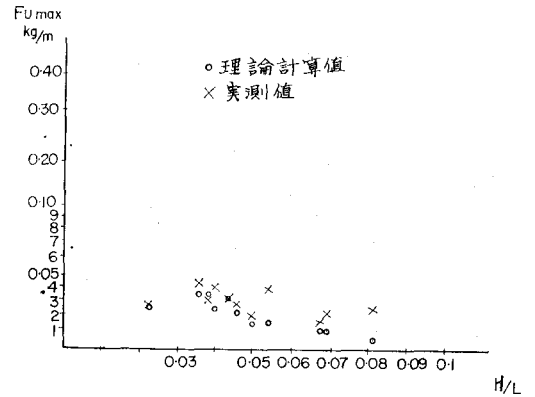


図-7 $H/L \sim F_{Umax}$

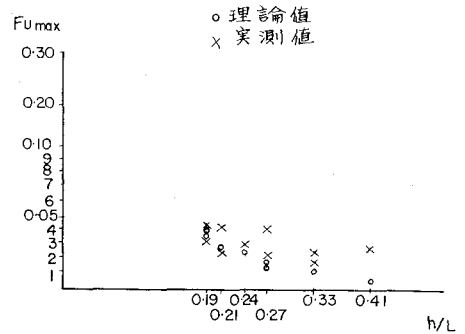


図-8 $h/L \sim F_{Umax}$

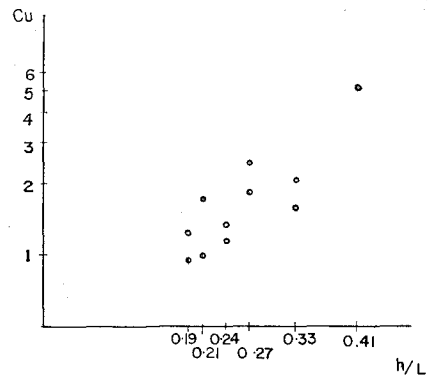


図-9 $h/L \sim C_U$

$H/L \sim F_U$ (理論計算・実測) と $h/L \sim F_U$ (理論計算・実測) を図-7, 図-8 に $h/L \sim C_U$ (実測) を 図-9 に示す。 $H/L=0.0364 \sim 0.078$ $h/L=0.19 \sim 0.41$ の範囲で $C_U=0.87 \sim 5.2$ 平均 1.87 である。設計では、一般に円形柱体波圧理論を適用する場合、 $C_D=1.0$ $C_M=2.0$ を採っている。実測された C_D はそれより 2.5 倍の値を示し、 C_M は 2 倍となった。理論値からは $F_M=F_{\max}$ となるので、実測波力は理論波力の約 2 倍の作用力といえる。

以上の実測値から、パイプラインが洗掘によって海底地盤面上でブリッジ化した最悪状態、あるいは海底地盤が岩盤で均一にできない場合、設計の最大値として $C_D=2.5$, $C_M=4.0$, $C_U=2.0$ をとることも必要ではないかと思われる。

4. 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潮力

流れの中に置かれたパイプに作用する力については一般に流れの速さの二乗に比例する抗力、および揚力のみが作用すると考えられ、その抗力、揚力についてはパイプ回りの流れの状態 Re (Reynolds 数) と関係する。

よって、パイプに作用する潮力の理論計算値と実測値との比較、模型パイプの前後に障害物を置いたとき作用する抗力、揚力の変化と $C_D \cdot C_L$ の増減、パイプ回りの流線等について実験した。

(1) 理論式

一般に定常流の中におかれたパイプに作用する水平力 (F_D), 揚力 (F_L) については式 (1), (2) で示される。

$$F_D = \frac{w_0}{2g} C_D \cdot u^2 \cdot A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_L = \frac{w_0}{2g} C_L \cdot u^2 \cdot A \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 w_0 : 水の単位体積重量, u : 流体の速度, A : 流れに直角方向の物体の射影面積, C_D : 抗力係数, C_L : 揚力係数。

なお、パイプ回りの流速とレイノルズ数 Re との関係は式 (3) で示される。

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 D : パイプの外径, ν : 流体の動粘性係数 ($0.013 \text{ cm}^2/\text{sec}$)

(2) 水平力と抗力係数

図-10 にみられるように測定値には多少のばらつきがあり (パイプに作用する水平力と測定アームのもつ固有振動数との関係から共振現象が生ずる), 流速が遅くなるほど理論計算値との差が大きい。流速の変化と水平力 F_D とは一義的な関係からは決定できないことを示し

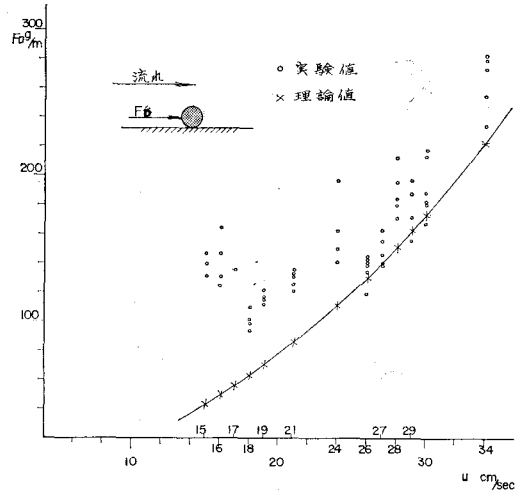


図-10 定常流によるパイプに作用する水平力

ており、理論式にも問題点がある。抗力係数 C_D については、特にパイプのように質量の小さい物体の場合、 $C_D=1.0 \sim 1.5$ をとっているが、海底パイプラインのようにそれ自体のもつ固有振動とパイプに作用する動的荷重による振動が共振することもありうるので、 C_D としては 1.5 以上をとることが必要と思われる。

今回の実験による実測抗力係数 C_D は 図-11 に示されるように 1.0~4.5 まで分布し、 Re との間には一定した関係を有している。実験結果から $Re \sim C_D$ を実用的に考える場合、 $C_D=1.5 \sim 2.0$ 流速が低くなるにしたがって構造物の重要性から $C_D=1.5 \sim 4.0$ の値をとることが必要である。パイプに作用する力をスポイラー (阻止板) 以外の障害物で、ていげんすることを考え、パイプ前面、パイプ前面・後面に、それぞれ三角形のコンクリートブロックを置いた場合、パイプに作用する水平力を測定した。前面に置いた場合、図-12 に示されるように、何も置かない場合よりも 20~30% 作用力は増加する傾向がみられた。これはブロックによる流線の乱れが直接パイプに作用し、不規則な力と振動を生ずることによるもの

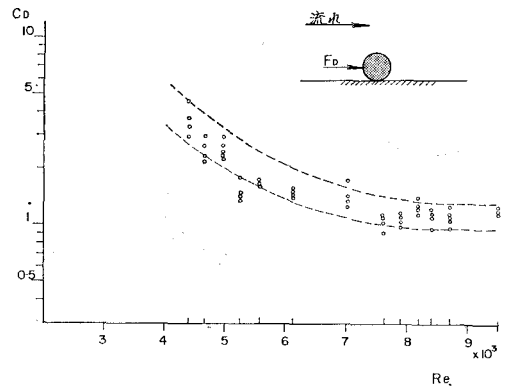
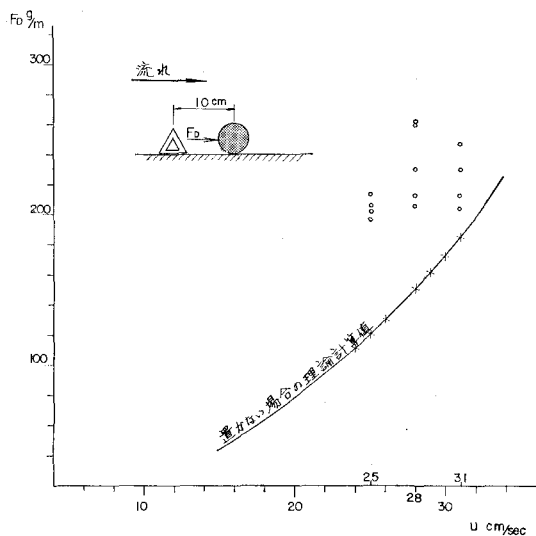
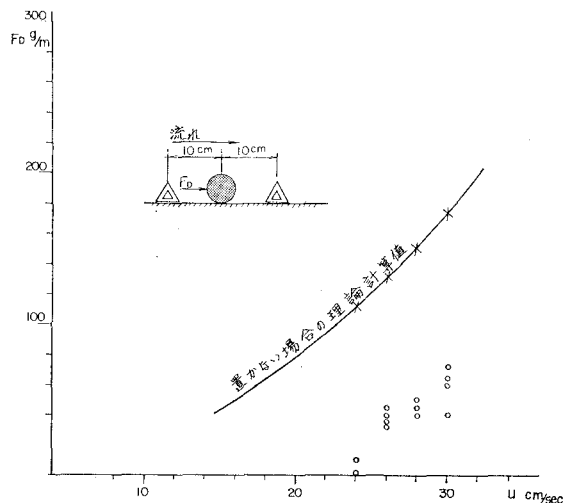


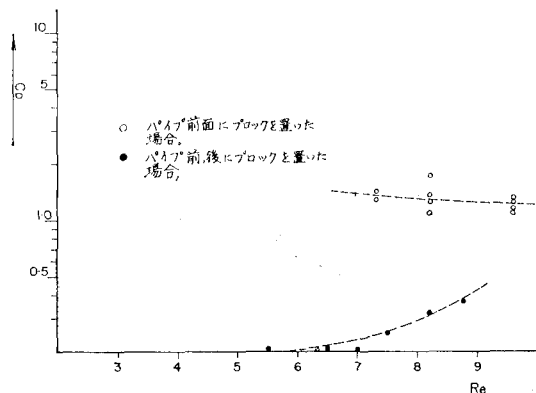
図-11 $Re \sim C_D$



図—12 パイプ前面に三角形のブロックをおいた場合パイプに作用する水平力



図—13 パイプ前面、後面に三角形のブロックをおいた場合、パイプに作用する水平力

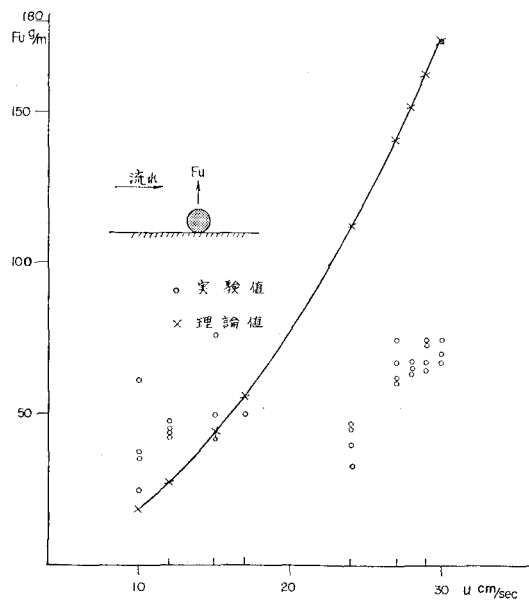


図—14 $R_e \sim C_D$ (ブロックをおいた場合)

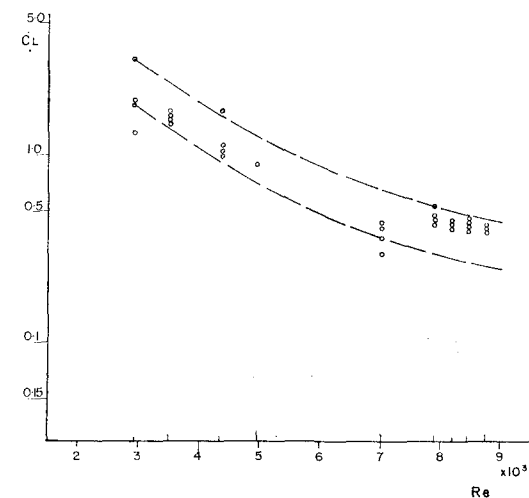
である。ブロックを前・後に置いた場合 図—13 に示されるように作用力は急速に減少し、その有効性が認められる。これは前面ブロックにより上昇した流れが後方のブロックを通過してから元の定常流に戻るからである。 R_e と C_D との関係を 図—14 に示す。

(3) 揚力と揚力係数

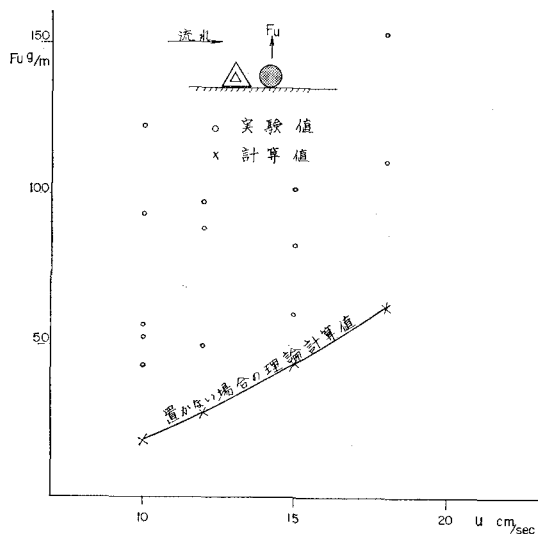
図—15, 図—16 に示されるように、計算値と実測値とでは大きな相違がみられ、 R_e と C_L との間には一定の関係があることを示している。 $C_L = 0.3 \sim 3.5$ と大きく変動し、流速がおそくなると逆に C_L は大きくなる。パイプ前面にブロックを置いた場合、揚力は 図—17 のごとく



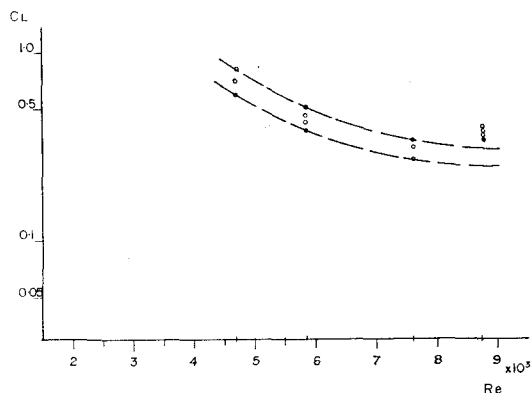
図—15 定常流によるパイプに作用する揚力



図—16 $R_e \sim C_L$



図—17 パイプ前面に三角形のブロックをおいた場合、パイプに作用する揚力



図—19 $R_e \sim C_L$ (ブロックを置いた場合)

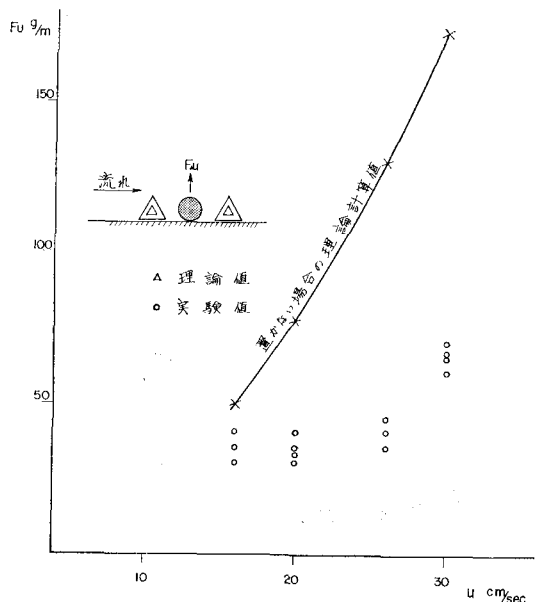
急速に増加し、ばらつきは大きい。前後に障害物を置いた場合の実測揚力は計算値より 図—18, 図—19 のごとくかなり小さい。揚力係数 $C_L=1.5 \sim 2.0$ を実際の設計時に採用しているが、この値は今回の実験からは適当ではないと思われる。

5. 結 言

日本沿岸において考慮すべき最大波浪は、波高 $H_{max}=11 \sim 13$ m, 周期 $T=13$ sec と思われる。

また潮流については早い流速と複雑な動きを示す所がある。海底パイプライン (水道・油・下水, 取水, その他) を外洋の大水深に設置する場合、海象・地形を十分把握した上で安全な設計を行なう必要がある。

この際、パイプラインがブリッジ状となった最悪条件が想定されるので水槽実験を上述のように実施したが、その結果、抗力係数、質量力係数、揚力係数ともかなり高い値が示され、またパイプ前面に障害物を置くと抗力、揚力は急激に増加し、前・後両面に障害物を置くと急激に抗力・揚力が減少することがわかった。これより施工を考慮した実用的な設計ができるものと思われる。



図—18 パイプ前面、後面に三角形のブロックを置いた場合、パイプに作用する水平力