

固定式プラットホームに作用する波力に関する模型実験

関 田 欣 治*

1. 要 約

新日本製鉄では数年来、海洋構造物の設計加工、施工を行って来ており、その間、構造物はますます大型化複雑化して来ている。したがって設計上波浪についてはより合理的でかつ安全妥当な設計を行う必要がある。そこで昨年当社が受注した日本海阿賀沖 Jacket Structure の縮尺 1/60 の模型を用いて実験を行って来た。現在海洋構造物設計での世界的趨勢である Stokes 5 次近似波理論を用いて得られた波力係数、その他の実験結果や若干の考察を発表する。

2. 阿賀沖ジャケットの概要

Jacket 部分の構造は 図—1 に示すような構造形状をしており、8 本の Jacket leg と 4 本の Skirt pile によって支持されるものである。重量としては Jacket 本体で 2500^t におよぶ。さらに 30^φ の Conductor pipe 15 本を支持する構造である。

3. 実験の概要

(1) 実験装置

実験には相模原技術センターの造波水路を用いた。造

波水路の概要は 表—1 に示すような諸元を有し、関数発生器で作られた信号を増幅し、プリントモーターによって油圧シリンダーの方向を切換え、造波板を前後に移動させ波起を行うものである。また、水路の両端にはエキスパンドメタル、グラスウール、ステラシート等から構成される特別の消波装置がある。また供試体を吊り曳行できる機能を有する測定台車が、水路上に敷かれたレール上にあり、移動は等速度等加速度で行える。なお、 図—2 が測定系および造波機制御を含めた実験装置図である。

(2) 供 試 体

供試体の縮尺は造波水路の能力、現場の水理条件によって、1/60 の Froude 模型とした。供試体はアクリライトで製作し、Jacket のみの場合、Jacket と Conductor pipe を一体とした模型、Boat landing (1/20 の縮尺)である。なお、 図—3 は、試験中の Jacket モデルである。 図—4 は試験中の Boat landing である。

(3) 波力測定装置

波力のように刻々外力の作用中心が変化するので、2 点間の曲げモーメント差 ΔM から、すなわち

$$\Delta M_{AB} = F \Delta y, \quad \Delta M_{CD} = U \Delta y$$

によって、力、 F 、 U が得られる。

ただし、

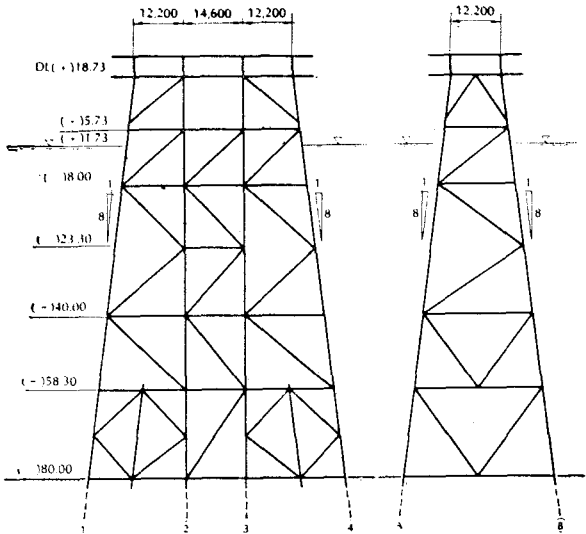
$$\Delta M_{AB} = M_A - M_B, \quad \Delta M_{CD} = M_C - M_D$$

である(図—5 参照)。

したがって、2 点間のモーメント差を不平衡電流としてとりだすブリッジ回路を組み、波力は同時に水平方向、鉛直方向力として検出した。なお、測定系は 1 つの振動系になっているので、前もって自由振動予備試験を行い、測定系の固有周期 T_N 、対数減衰率 λ を求めておき、次式より測定データの補正を行わねばならない。すなわち測定データは、周

表—1 造波水路諸元

断面水路	2.5 m (巾)	2.0 m (高)
全 長	6.8 m	
型 式	任意波形フラップ型	
周 期	0.5 ~ 5 sec	
最大水深	1.6 m	
最大波高	40 cm	



図—1 阿賀沖 Jacket structure

* 正会員 新日本製鉄相模原技術センター海洋施設グループ

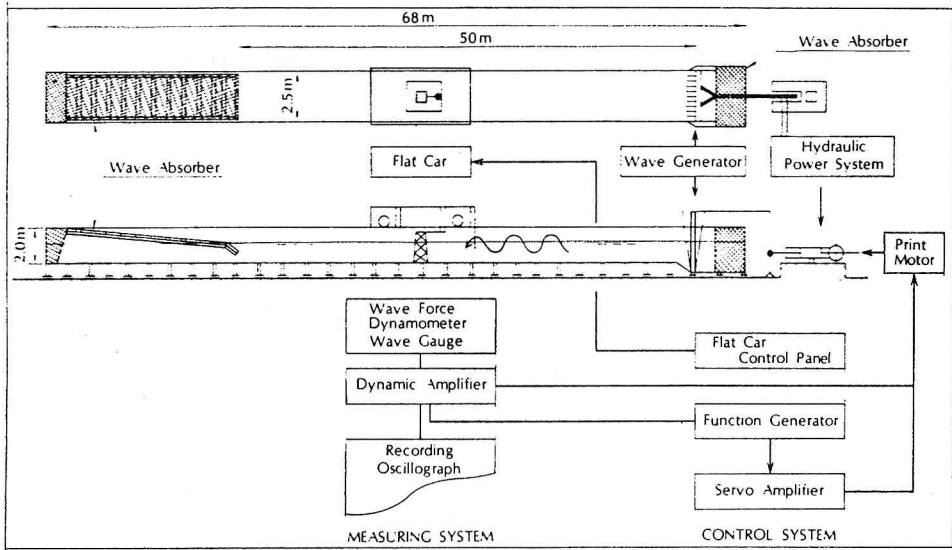


図-2 実験装置図

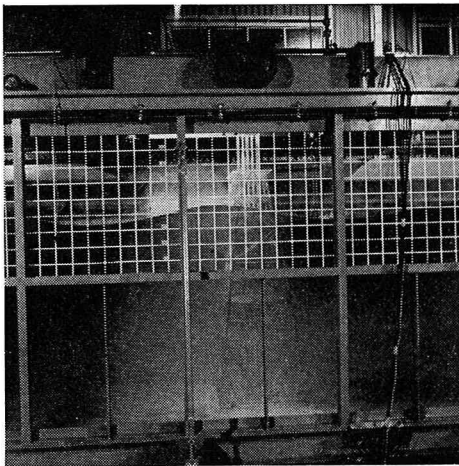


図-3 実験中の Jacket Model

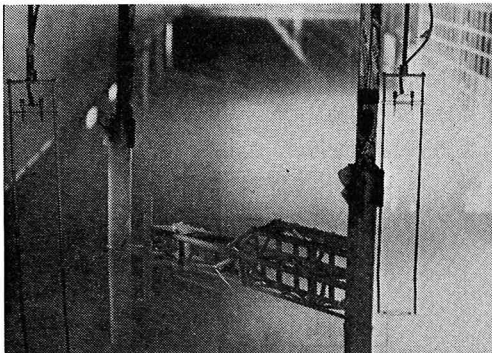


図-4 実験中の Boat Landing

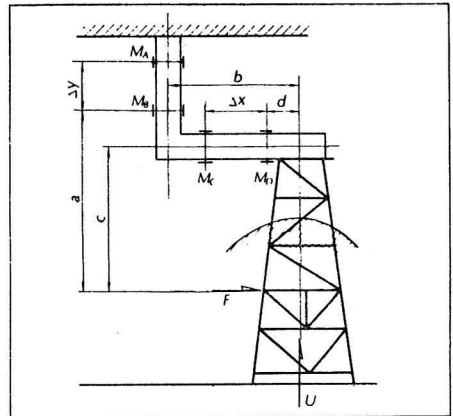


図-5 測定系

で表わされるように K 倍の力が τ だけ遅れて作用したことになる。ただし K, τ はそれぞれ、次式から得られる。

$$K = 1 / \sqrt{\{1 - (T_N/T)^2\}^2 + (2\lambda T_N/\pi T)^2}$$

$$\tan(2\pi\tau/T) = 2\lambda T_N/\pi T \{1 - (T_N/T)^2\}$$

ここに、 T_N : 測定系の固有周期

T : 外力の周期

λ : 対数減衰率 ($\lambda = \ln \nu$)

本実験では水平鉛直方向の倍率、位相遅れは表-2に示すように、1.1秒の周期で、1%程度であり、位相遅れも水平アームで 0.12 sec, 鉛直アームで 0.32 sec である。

(4) 実験条件

実験条件は Jacket 設置地点の水理条件にできるだけ近づけて行った、表-3が現地との比較で表-4に波の諸元を示した。

期的外力 $F' \sin \frac{2\pi t}{T}$ に対し、

$$F = KF' \sin \frac{2\pi}{T}(t - \tau)$$

表-2 測定用アームの諸元

Component	T, sec.	Period of External Force, T, sec.		
		1.1	1.5	1.7
K	Horizontal	1.013	1.007	1.005
	Vertical	1.012	1.007	1.005
r	Horizontal	0.12	0.12	0.12
	Vertical	0.32	0.32	0.32

表-3 現地と模型の比較

	現地の条件	模型寸法
水深	80 m	133 cm
波高	23.2 - 7.8 m	38.7 - 13.0 cm
周期	13.6 - 10 sec.	1.74 - 1.30 sec.
波長	274 - 156 m	4.6 - 2.6 m
潮流	51.5 cm/sec.	6.6 cm/sec.

表-4 実験ケース

周 期	0.9 sec (7.0)	1.1 sec (8.6)	1.5 sec (11.6)	1.7 sec (13.3)	3 sec (23.2)	4 sec (31.0)	5 sec (38.7)
波 高 m (cm)	5.0 (8.0)	13 (7.8)	12.5 (7.5)	11 (6.6)	11 (6.6)	8 (4.8)	6 (3.6)
	8.0 (4.0)	19 (11.4)	27 (16.2)	24.5 (14.7)	18 (10.8)	14 (8.4)	10 (6.0)
		2 (13.2)	38 (22.8)	35 (21)			
			42 (25.2)	37 (22)			

() 内は現地での諸元

4. 波力算定理論

波力算定は Morison 公式により求める。すなわち直径 D の円柱 ds 部分に作用する波力ベクトル df は

$$df = \frac{W_0}{g} C_D DV |V| ds + \frac{W_0}{g} C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial V}{\partial t} ds$$

で与えられる。

ここに、 W_0 : 流体の単位体積重量、 g : 重力加速度、 V : 流体の流速ベクトル、 $\frac{\partial V}{\partial t}$: 流体の加速度ベクトル、 C_D : 抗力係数、 C_M : 質量力係数

任意部材に作用するある時刻における波力は V 、 $\frac{\partial V}{\partial t}$ の位相差を考慮して、その部材の長さの方向について積分して求められる。

部材に作用する波力

骨組構造物である1部材に着目しその両端の位置ベクトル x_i, x_j から部材軸方向ベクトル e は

$$e = \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|}$$

で得られる。波力のうち抗力成分は、部材と流速ベクトル V とを含む平面内において部材と直角方向の流速成分 V_n によってのみ生ずる(図-6 参照)。すなわち

$$df_D = \frac{W_0}{g} C_D D |V_n| V_n ds$$

で与えられる。ただし

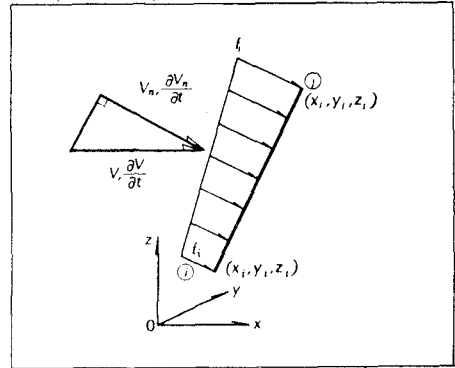


図-6 各ベクトルの関係

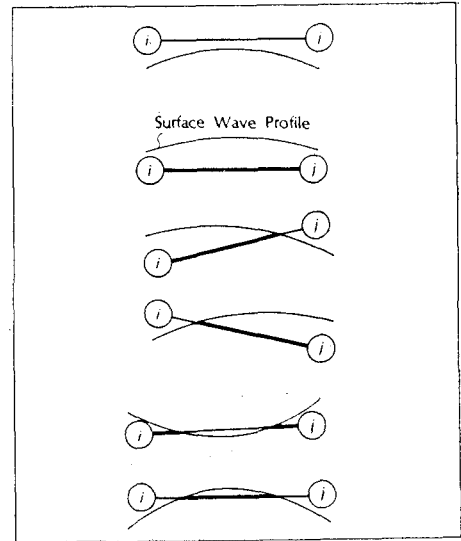


図-7 波力の作用範囲 (実線)

$$V_n = e \times (V \times e)$$

であり、質量力成分も同様に、

$$df_M = \frac{W_0}{g} C_M \frac{\partial V_n}{\partial t} \frac{\pi D^2}{4} ds$$

で与えられる。なお、波力作用範囲は部材と部材を切る水面波形 $\eta = \eta(x, t)$ との相対関係により考慮して定められる(図-7 参照)。

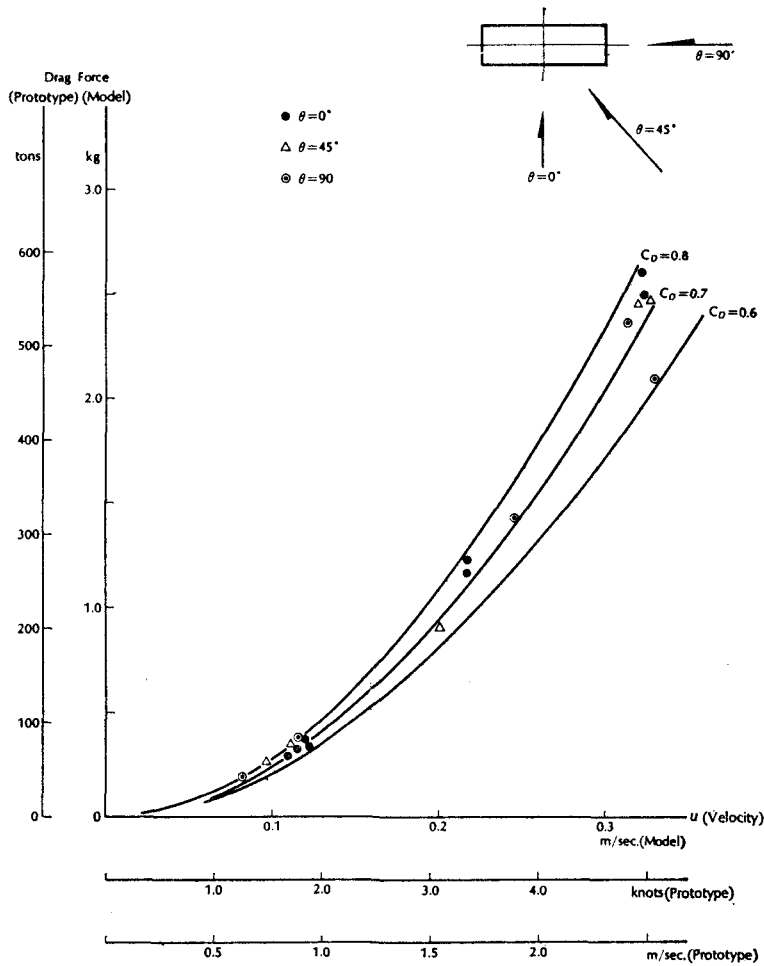
5. 実験結果

(1) 潮流に対する Jacket の抵抗

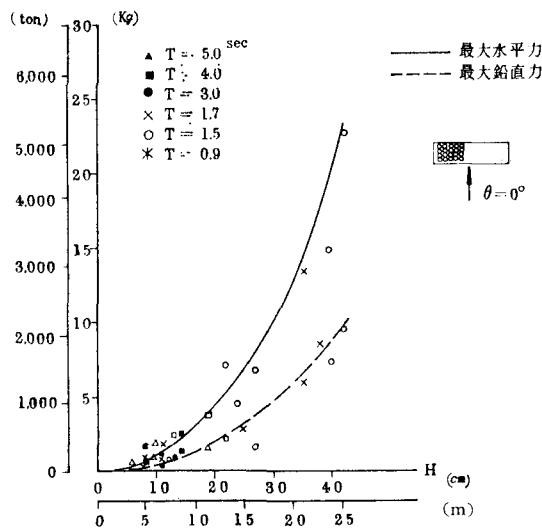
潮流に対しては Jacket を造波水路の走行台車に取り付けて走行した。潮流力の計算は波力算定と同様に行い流体の加速度ベクトル $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ 、流速ベクトル $V = (u, 0, 0)$ として、骨組に作用する潮流力を各部材ごとに計算した。

これらの結果は図-8に示すようにほぼ抗力係数 $C_D = 0.8 \sim 0.6$ の範囲に分布している。主な結果は次の通りである。

1) 流向による相違……潮流の方向による相違は特に



図—8 抗力係数と潮流速度



図—9 最大波力と波高の関係

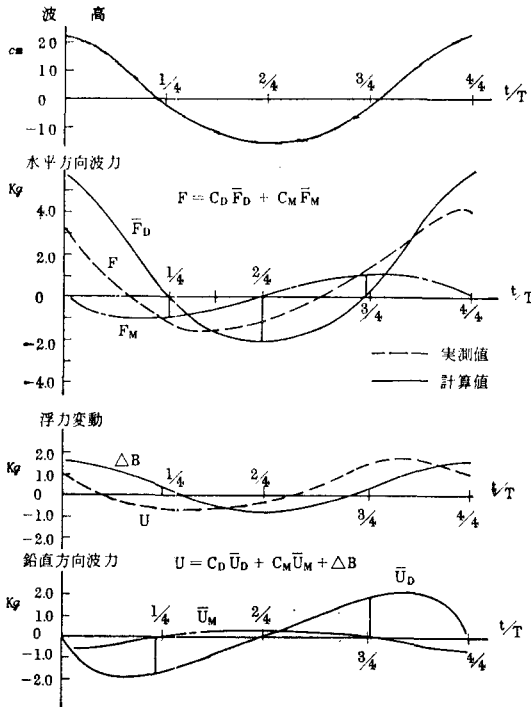


図-10 波力成分と波との関係

波力係数

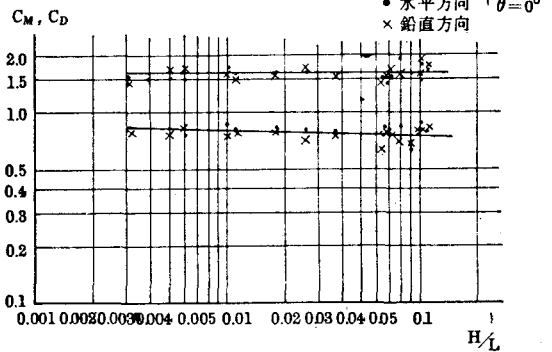


図-12 波形勾配と波力係数の関係

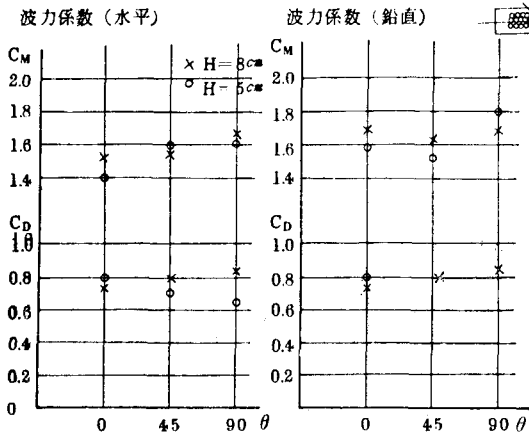


図-11 波方向と波力係数の関係

認められない。

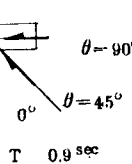
- 2) 流速による影響……流速が増加すると多少抗力係数が減少する。

(2) 波浪に対する Jacket の抵抗

a) 最大波力

図-9 が Jacket と Conductor pipe を一体とした供試体での最大波力と波高の関係である。水平力の方が鉛直力よりかなり大きい、波力分布は放物線状になっており、長周期の場合の方が立ち上がり方が急の傾向がある。

b) 波力係数

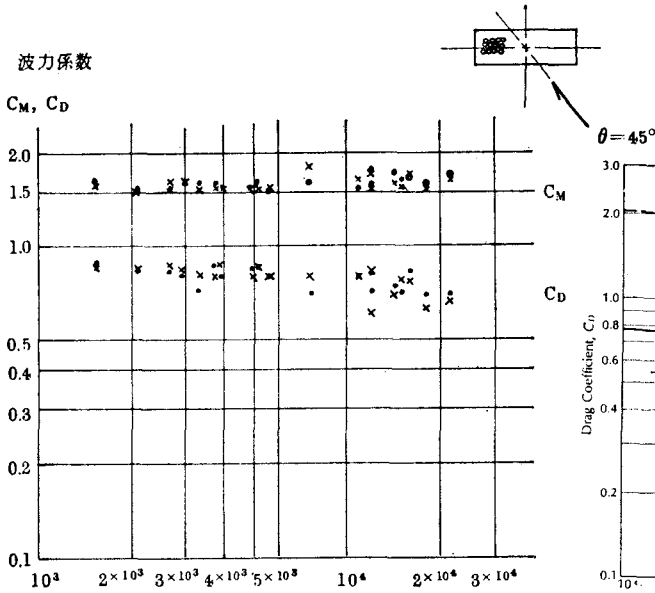


Stokes 5 次近似式¹⁾を用いて、全節の波力算定方法で、抗力成分、質量力成分を計算したのが(いずれも $C_D=1$, $C_M=1$ とした) 図-10 で、どちらか一方の成分がゼロになる位相での実験値より、抗力係数 C_D 、質量力係数 C_M を求めた。ただし鉛直方向については浮力変動分を差し引いておく必要がある。

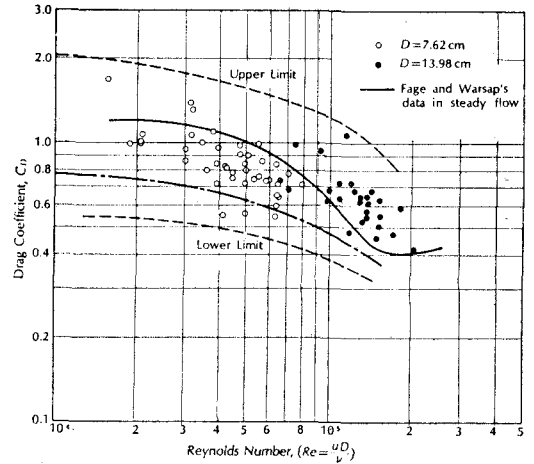
① 波方向による相違: 質量力係数の波向による相違は低周期の場合 θ が 90° に近い場合質量力係数は増加する傾向にあり、長周期(3.0 秒以上)ではこの傾向がみられなくなる。抗力係数は、ほぼ一定に分布している。模型による相違は特になく、同様の傾向にある(図-11)。

② 波形勾配との関係: 波形勾配と波力係数の関係は 図-12 に示したが、質量力係数は波形勾配は無関係であり、ほぼ一定である。一方、抗力係数は波形勾配の増加とともに減少する傾向にある。供試体による相違は特になく全体に同様の傾向である。

③ レイノルズ数との関係: 平均水面での流速と Jacket leg の径を用いて求めたレイノルズ数との関係の代表的例を 図-13 に示したが、全体として供試体による相違はみられず、質量力係数はほぼ一定で 1.5~1.8 程度で、抗力係数はレイノルズ数の増加に伴い、減少する



図—13 レイノルズ数と波力係数の関係



図—14 円柱のレイノルズ数と抗力係数の関係

傾向にある。

④ 波力方向の相違: 波力係数は水平方向, 鉛直方向とも, 特に差異はみられない。

6. 考察および結論

潮流による影響

潮流による Jacket の抗力係数はほぼ骨組全体として, $0.6 \sim 0.8$ の範囲であり, 該レイノルズ数 6×10^3 で単柱での抗力係数実験結果²⁾ ($C_D = 1.1$) に比較して, いずれもかなり小さな値になっている。したがって, 潮流に対し上流側の部材が遮蔽し, 下流側の部材に差程大きな潮流力が働かないと思われる。

波浪による影響

波力による抗力係数や質量力係数は水平方向鉛直方向とも単杭の実験値に比較して骨組として影響が表われている。すなわち波に対して全面の部材の遮蔽の効果が生じていると思われる。同様に Conductor pipe を含んだ Jacket と Jacket 単体での波力係数の比較についても, 多少ばらつきはあるが一般に C_D, C_M とも Conductor pipe を含んだ Jacket の方が多少低めに表われている。

以上模型実験によって得られた抗力係数 C_D はレイノルズ数 $10^3 \sim 2.2 \times 10^4$ の範囲で, 現実の設計に対応する

レイノルズ数は $5 \times 10^5 \sim 10^7$ になる。しかし, この範囲での構造物としての抗力係数を求める実験は難しい。試みに実験での構造物としての抗力係数と単柱との比 $0.8/1.1$ を構造物としての抗力係数の逓減率と考えれば, $10^5 \sim 10^6$ の範囲での抗力係数はすでに得られている抗力係数のデータ³⁾ (図—14) から外挿して求めることが出来, 大体 $0.4 \sim 0.5$ の範囲になると思われる。あるいは図—13 に示したレイノルズ数との関係からも同様に外挿できるとと思われる。質量力係数についてはレイノルズ数と無関係なことを考えると結論として, Stokes 5 次近似式を用いた場合,

質量力係数 $1.6 \sim 1.7$

抗力係数 $0.5 \sim 0.6$

を用いれば良いと思われる。

参考文献

- 1) Skjelbreia L: Fifth order gravity wave theory, Chapter 10, Coastal Engineering.
- 2) 伊藤英覚: 一様な流れの中の物体の抵抗, 水工便覧, p. 136, S 41.
- 3) W. Wilson and O. Reid: Wave force coefficients for offshore pipelines, Proc. of ASCE, Vol. 89, WW 1, Feb., 1963.