

海中の近接した2個の冷却水取水塔に作用する波力

中 村 宏*・阿 部 宣 行*

1. 概 要

冷却水取水塔のような大型の海中構造物を近接して設ける場合、入射波と各構造物の回折散乱波が干渉して、構造物に作用する波力は、構造物が単独で存在する場合に作用する波力とは異なってくると考えられる。複数の円柱が近接して存在する場合の波力に関しては、大楠¹⁾の回折理論による研究、堀川・勝井²⁾の2本ないし3本の円柱を対象とした実験的研究、Laird ら³⁾の静水中で複数本の円柱を振動させた実験的研究などがあるが、いまだこの問題が十分解明されたとはいえず、実際の構造物の配置を定めるに当っては模型実験を行なって十分検討する必要がある。

本研究は水深約 10 m のところに直径 16 m のほぼ円柱状の冷却水取水塔を2個設置する場合を対象とし、主として波向、取水塔間距離によって波力がどのように変化するかを実験的に求めることを目的としたものであり、あわせて行なった近接した2個の大型円柱に作用する波力についての実験結果とともに紹介する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は長さ 26 m、幅 8 m、高さ 1 m で

(図-1), この中に取水塔模型あるいは円柱を1個または2個配置して波力の測定を行なった。取水塔模型としては図-2に示す縮尺 1/30 のもの、および縮尺 1/60 のものを用いた。これらの模型の形状は実際の取水塔形状をやや単純化している。また1号取水塔と2号取水塔の取水口部分の形状は若干異なっている。一方円柱は直径 50 cm、および 25 cm (高さはいずれも 55 cm) のものを用いた。

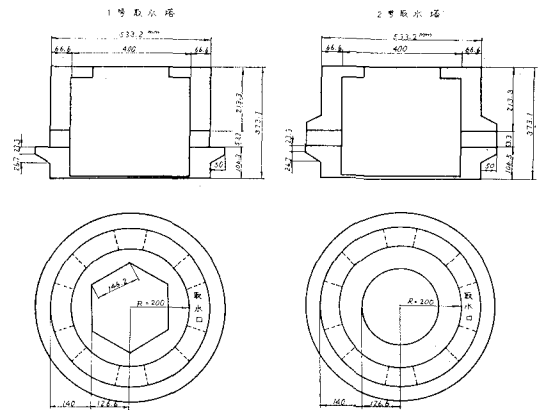


図-2 取水塔模型 (縮尺 1/30)

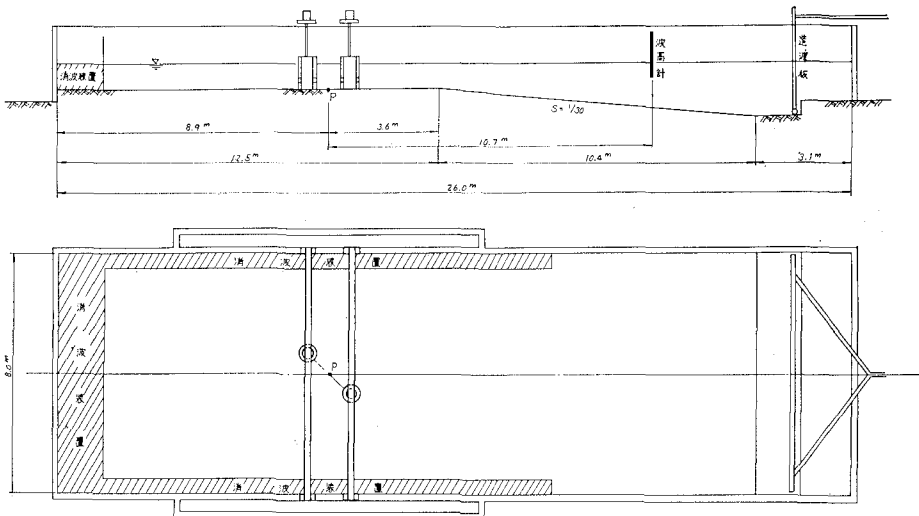


図-1 実験装置概要図

* 正会員 電力中央研究所技術第二研究所

本実験で用いた取水塔模型、円柱はいずれもかなり大型のものであって、これらが単独で水中に存在する場合には、抗力係数として $C_D=1.0$ 、質量係数として回折理論による値を用いると、実験を行なったすべての条件で質量力が卓越している。

波力の測定には図-3に示す装置を用いた。すなわち取水塔模型あるいは円柱の天端中心に、これに垂直に正方形断面の角形鋼をとりつけ、この角形鋼を水槽上に架設した I ビームに固定した。角形鋼にはストレインゲージを4枚接着し、これを動ひずみ測定器を経て記録器に接続した。この装置は物体に作用する波力のモーメントによって生じた角形鋼のひずみ量を記録紙から読みとって、波力を求めようとするものである。この実験では角形鋼の正面および側面にそれぞれ2枚のゲージを接着し、波力を直交する2方向の分力として求め、これより合力を計算した。また波力の測定に際しては取水塔模型を懸垂している部材に波が当り、測定結果に影響するのを防ぐため、上部を固定したカバーでこれを覆った。波力の測定に先立って、載荷試験装置に取水塔模型あるいは円柱を波力の測定の場合と同じ状態でとりつけ、これに水平静荷重を作用させて、荷重のモーメントと角形鋼のひずみ量の記録の関係を調べたが、直線性はきわめて良好であった。

波高は図-1に示す位置に電気抵抗式波高計を設置して測定した。この実験では波向、物体間距離を変えるたびに物体の設置位置が変わるが、波力の測定に際しては大部分の場合は2つの物体の中心を結ぶ直線の中点が図-1の点Pと一致するようにした。波力の測定に先立って波高計設置箇所の波高と点P周辺の波高の関係を調べ、波力測定結果の解析にはこの関係から換算した取水塔模型あるいは円柱設置地点の波高を用いた。

3. 1個の取水塔または円柱に作用する波力

取水塔または円柱が2個ある場合の波力測定結果と比較するため、まずこれらが1個だけ水中にある場合について波力の測定を行なった。実験条件は表-1に示すとおりである。

すでに述べたように本実験では質量力が抗力より卓越している場合を対象としているが、取水塔の場合はその天端の静水面上の高さが低く、縮尺 1/30 の模型では波

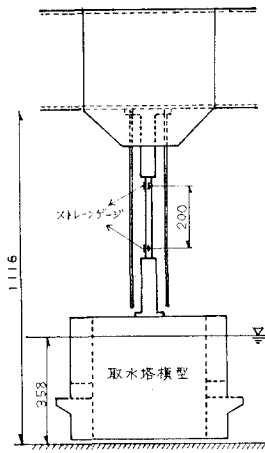


図-3 波力測定装置

表-1 取水塔、円柱が水中に1個存在する場合の実験条件

	水深 (cm)	波高 (cm)	周期 (sec)
取水塔(1号,2号) 縮尺 1/30	35.8	5.2~19.5	1.10, 1.28, 1.64
" (") 縮尺 1/60	17.9	6.9~11.6	1.55, 1.94
円柱(直径 25 cm)	35.0	9.1~19.3	0.95, 1.28, 1.57
" (直径 50 cm)	35.0	9.3~19.0	1.06, 1.28
" (直径 100 cm)	35.0	4.9~11.5	1.06, 1.57

高が 10 cm 程度以上になると天端を越えた波が天端中央の開口部から取水塔内部に入り、内壁に打込み波力をおよぼす。しかしこれを分離して測定するのは困難であったため、この打込み波力も質量力の中に含めて考えることにした。

取水塔は側面に6個の開口部があり、かつこの部分には突出部があるにもかかわらず、前回行なった1号取水塔模型についての波力測定結果⁴⁾によれば、その質量係数値としては円柱の質量係数値を用いてさしつかえないと考えられる。しかし今回波力の測定を行なった2号取水塔の取水口部分の突出部はかなり大きく、このような円柱との形状の違いが測定結果に影響すると考えられたため、ここでは次のような取扱いをした。

取水塔およびこれと同一直径の円柱が等しい水深で同一波高、同一周期の波を受けたときの両者に作用する波力の比を便宜上、形状係数とよぶことにすれば、この値は次のような仮定を設ければ求めることができる。

- イ. 同一直径の取水塔と円柱の質量係数は等しく、かつ水深方向にその値が一定であって、取水塔側面の突出部でも値が変わらないとみなす。
- ロ. 取水塔の取水口部分は閉塞されていて水の出入りはないものとみなす。
- ハ. 天端はいずれも高く、波峰が天端を越えることはないものとみなす。

以上のような仮定を設ければ、取水塔、円柱に作用する波力の比、すなわち上に述べた形状係数 K は

$$K = \frac{\int_0^{h+\eta} S \cosh k z d z}{\frac{\pi D^2}{4} \int_0^{h+\eta} \cosh k z d z} \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで、 S : 高さ z における取水塔の平面積、 k : 波数、 D : 取水塔の基本形状となっている円柱の直径、 h : 水深、 η : 静水面上の波峰の高さである。

この K を用いれば、取水塔に作用する最大波力 $(F_T)_{\max}$ すなわち最大質量力 $(F_M)_{\max}$ は、水粒子加速度に微小振幅波理論による値を用いれば、

$$(F_T)_{\max} = (F_M)_{\max} = \frac{w}{2g} K C_M \frac{\pi^3 D^2 H}{T^2 \sinh k h} \int_0^{h+\eta} \cosh k z d z \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、 C_M : 取水塔の基本形状となっている円柱の質量係数である。

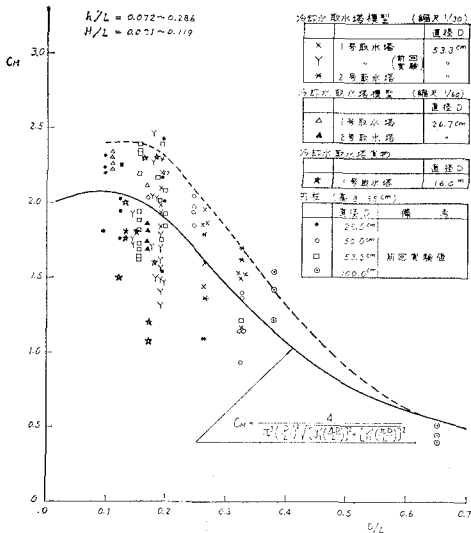


図-4 冷却水取水塔および円柱の質量係数

なお、取水塔の K 値は、式 (1) の積分上限値に近似的に h をとり、実験を行なった水深、周期についてその値を求めると、1号取水塔では $K=1.033\sim 1.046$ 、2号取水塔では $K=1.136\sim 1.153$ であった。

本実験では取水塔模型周囲の波高の測定を行っていないため、最大波力の測定結果から式 (2) によって取水塔の質量係数を算出するに当って、積分上限値として近似的に h を用いた。

表-1 に示した実験条件で得た C_M 値は図-4 に示すとおりである。なおここには前回の実験で得た1号取水塔ならびに円柱の C_M 値、および浜岡原子力発電所の1号取水塔における波高の観測記録、波圧分布測定記録から推定した C_M 値をあわせて示した。実験値、現地観測値のいずれも、かなりばらついてはいるが、その平均値は回折理論から得られる C_M 値に近い。なおこの図には設計に用いる余裕をみた C_M 値として、実験結果の上限値をほぼ包絡する曲線を点線で示した。

4. 2個の取水塔または円柱に作用する波力

取水塔または円柱が2個ある場合の実験条件は表-2

表-2 取水塔、円柱が水中に2個存在する場合の実験条件

	直径 D (cm)	水深 h (cm)	波向 δ	距離 d (cm)	波高 H (cm)	周期 T (sec)	D/L
取水塔 (縮尺 1/30)	53.3	35.8	0°	66.7~300.0	5.0~18.7	1.10, 1.28	0.325, 0.190
			45°	100.0~266.0	6.4~17.9	1.10, 1.28	0.325, 0.190
			90°	66.7~233.3	5.1~22.4	1.10, 1.28, 1.64	0.325, 0.190, 0.137
取水塔 (縮尺 1/60)	26.7	17.9	90°	50.0~166.7	6.1~11.5	1.16, 1.55	0.190, 0.137
円柱	25.0	35.0	0°	66.7~166.7	8.4~13.5	0.95	0.190
			90°	30.0~133.3	8.4~13.9	0.95	0.190
円柱	50.0	35.0	0°	66.7~300.0	10.0~15.9	1.06, 1.57	0.325, 0.190
			90°	55.0~166.7	11.8~16.6	1.57	0.190

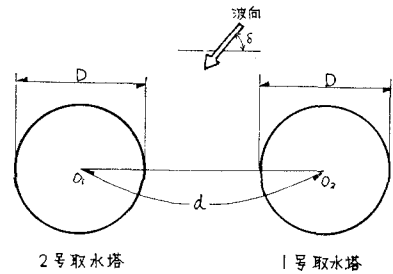


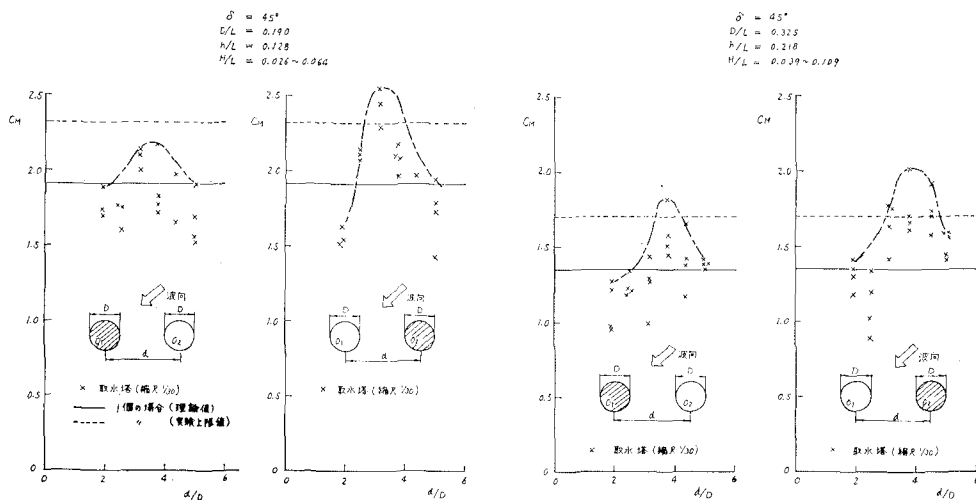
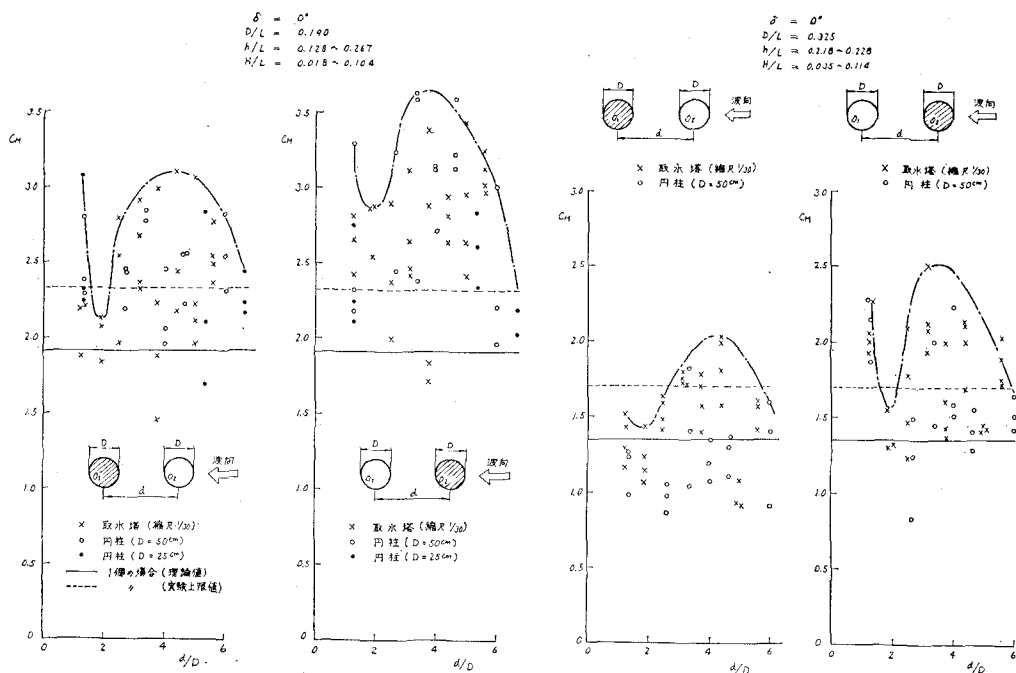
図-5 記号および取水塔配置

に示すとおりである。またここで用いる記号ならびに実験の際の取水塔配置は図-5 に示すとおりである。

表-2 の条件では、取水塔または円柱が1個だけの場合は質量力が抗力より卓越している。しかし取水塔または円柱が近接して2個存在する場合、最大波力すなわち最大質量力とみなしてよい問題がある。2個の大型の円柱状構造物に作用する波力は回折波の相互干渉により細い円柱の場合と比べて、位相のずれがあるため、測定結果から質量力だけを分離することができない。そこで測定結果すべてについて波高と波力の関係を調べたところ、大部分はこの両者の間に、ばらつきはあるが、ほぼ直線関係が認められた。ただし波向 0° の沖側の取水塔あるいは円柱の場合、距離によっては直線関係が成り立たず、波高と波力の関係が上に凹んだ曲線となる例があった。しかし本実験では距離、水深、波向、周期を同一にして波高を3~4種類程度しか変化させていないため、この点について十分な検討はできない。したがってここでは大部分の測定結果より判断して最大波力すなわち最大質量力とみなした。

測定結果から式 (2) を用い、積分上限値を近似的に h として C_M 値を求めた結果を波向別、直径・波長別に表示すと図-6~8 のようになる。ここで横軸は距離・直径比である。 C_M 値にはかなりばらつきがあり、取水塔と円柱の C_M 値の違いははっきりしないが、実際の設計にこれらの図を用いる場合を考え、上限値をほぼ包絡する曲線を示した。

本実験はごく限られた範囲の条件で行なったものであ



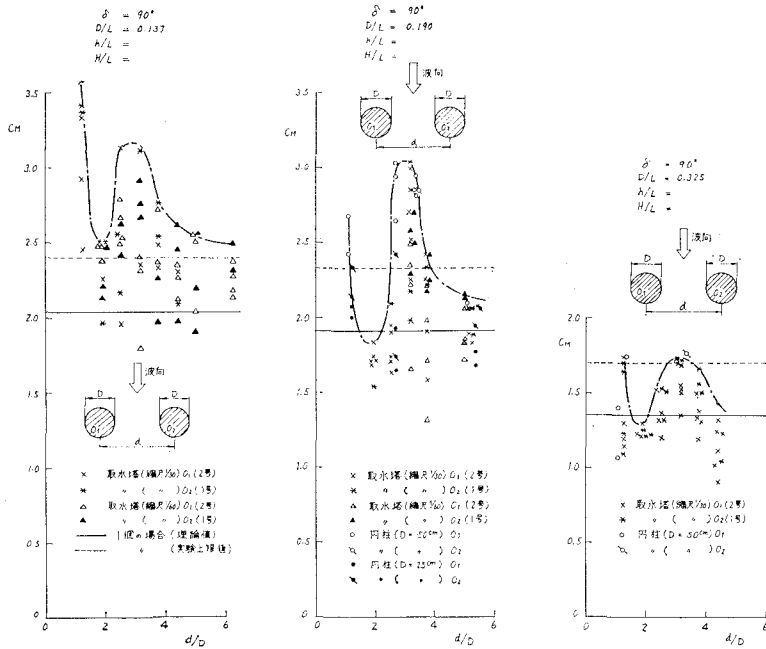
るが、ここに示した図によれば、以下のようにことがいえる。

- イ. 波向、直径・波長比に関係なく、 $d/D=3\sim4$ 付近で C_M の上限値は極大となる。たとえば、 $D/L=0.190$ の場合、設計値として、 $\delta=0^\circ$ の場合沖側取水塔では $C_M=3.6$ 、岸側取水塔では $C_M=3.1$ 程度をとる必要がある。また $\delta=90^\circ$ の場合は $C_M=3.1$ 程度をとる必要がある。なお $\delta=45^\circ$ の場合は実験値が少ないため、ここに示した C_M の上限値を設計

値としてとってよいか疑問があり、ほかの波向での C_M 上限値より判断して、 $C_M=3.1$ 程度をとるべきであろう。

- ロ. 波向、 0° 、 90° の測定結果から判断して、 $d/D=2$ 付近で C_M の上限値は極小となる。

ハ. 2個の円柱状物体の配置としては、波力の増大を防ぐためには、主たる波向に対し中心を結ぶ線が直角になるようにし、かつ $d/D=3$ 付近を避けるのが望ましい。

図-8 冷却水取水塔または円柱が2個ある場合の質量係数 ($\delta=90^\circ$)

参考文献

- 1) 大楠 丹: 複数本の鉛直円柱に働く波力について 日本造船学会論文集, No.131 (1972)
- 2) 堀川清司・勝井秀博: 複数円柱に作用する波力に関する実験, 第27回土木学会年次学術講演会 (1972)
- 3) Laird, A. D. K. et al.: Water Eddy Forces on Oscillating Cylinders, Proc. ASCE, Vol. 86, No. HY9 (1960)
- 4) 中村 宏・阿部宣行: 発電所冷却水取水塔の水理, 第19回海岸工学講演会論文集 (1972)