

発電所冷却水取水塔の水理

中 村 宏*・阿 部 宣 行*

1. ま え が き

最近の原子力発電所、火力発電所の建設地点は外洋に面した海浜となる場合が多く、大量の冷却水を取水するために種々の方法がとられているが、沖合に冷却水取水塔を設け、海底トンネルによって取水するのも一つの方法である。この冷却水取水方式は外国では幾つか実施例があるが、わが国では中部電力浜岡発電所において初めて採用され、現在施工中である。

外海に設けられる冷却水取水塔について水理的に検討すべき問題はいろいろあるが、ここでは浜岡発電所の取水塔を対象として行なった波力ならびに構造物周囲の浮遊砂濃度についての実験結果を紹介する。

2. 取水塔に作用する波力

冷却水取水塔の基本形状は円柱であるが、直径は 16 m とかなり大きく、さらに側面には取水口が設けられている。円柱に作用する波力についての実験はすでに数多く行なわれているが、直径の大きいものについての実験は少ないようであり、側面の開口部が水が出入りするような場合に果たして円柱としての波力を設計波力として用いてよいか疑問がある。そこで、このような構造物に作用する波力を実験により求め、直径の大きい円柱に作用する波力の理論計算値との比較を行なった。

海中に孤立した円柱に作用する波力は抗力と質量力の和として表わされ、水粒子水平加速度に微小振幅波としての値、水粒子水平速度に合田¹⁾の提案する微小振幅波理論の修正値を用いると、

$$\begin{aligned} \text{全 波 力} \quad F_T &= (F_D)_{\max} \sin^2(kx - \sigma t) \\ &\quad + (F_M)_{\max} \cos(kx - \sigma t) \\ &\quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{最大抗力} \quad (F_D)_{\max} &= \frac{w}{2g} C_D \frac{\pi^2 D H^2}{T^2 \sinh^2 kh} \\ &\quad \times \int_0^{h+\eta} \left[1 + \alpha \left(\frac{H}{h} \right)^{1/2} \left(\frac{z}{h} \right)^3 \right] \\ &\quad \times \cosh^2 k z d z \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{最大質量力} \quad (F_M)_{\max} &= \frac{w}{2g} C_M \frac{\pi^3 D^3 H}{T^2 \sinh kh} \\ &\quad \times \int_0^{h+\eta} \cosh k z d z \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

となる。ここで、 w : 水の単位体積重量、 g : 重力加速度、 D : 直径、 H : 波高、 T : 周期、 h : 水深、 k : 波数、 σ : 振動数、 α : 補正係数、 C_D : 抗力係数、 C_M : 質量係数である。

抗力は直径の 1 乗に、質量力は直径の 2 乗に比例するから、直径が大きいほど質量力は抗力より卓越し、 $(F_M)_{\max} \geq 2(F_D)_{\max}$ の条件となり、 $(F_T)_{\max} = (F_M)_{\max}$ となる。また直径が波長の数分の一以上になると、円柱の前後の位相差のために質量係数の値が減少する。この場合については、円柱の周りの波の回折を考慮してポテンシャル理論から得られる波力を質量力として表現し、質量係数として、

$$C_M = \frac{4}{\pi^3 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \sqrt{J_1' \left(\frac{\pi D}{L} \right)^2 + Y_1' \left(\frac{\pi D}{L} \right)^2}} \quad (4)$$

が得られている。²⁾

実験は実物の 1/30 の模型で行なったが、実験の対象とした取水塔の形状は 図-1 に示すとおりで直径 53.32 cm である。高さは 37.31 cm および 20.99 cm であって、側面に 6 カ所取水口が設けられている。前者は天端が常に静水面上にある形式、後者は天端が常に水面下にある形式である。なお施工中の鋼製ケーソンについてもあわせて実験を行なった。実験は長さ 26 m、幅 8 m、高さ 1 m の水槽内に上記の取水塔模型を設置して行なった。実験設備の概要は 図-2 に示すとおりで、実験条件は水深 27 cm~35 cm、波高 5 cm~26 cm、周期 1.1 sec~2.2 sec である。

波力の測定には森平ら³⁾が異形ブロックで前面を被覆された防波堤本体に作用する波力の研究に用いたのと同

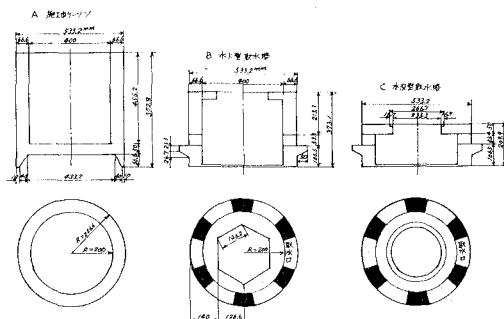
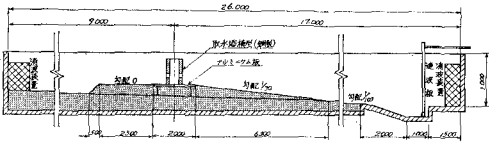
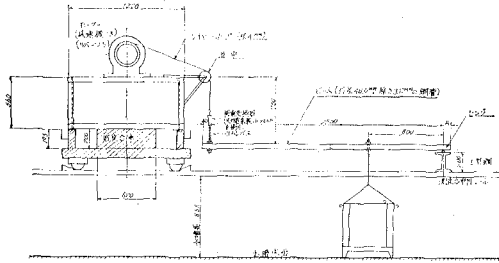


図-1 取水塔模型



(単位 mm)
図—2 模型配置図

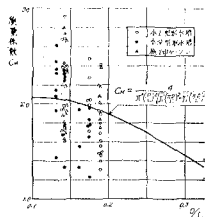
様な装置 (図—3) を用いた。すなわち、取水塔模型の重量を連続的に変化させて、ちょうど模型がある波力を受けて滑動しようとするときの模型重量と、あらかじめ測定済みの模型底面と海底面間の静止摩擦係数を使用して、取水塔模型に作用する波力を得ようとする方法である。



(単位 mm)
図—3 全波力測定装置

前記の実験条件について抗力と質量力の大きさを式 (2), (3) により検討すると、波高が非常に大きい場合を除けば、 $(F_M)_{\max} \leq 2(F_D)_{\max}$ となるので上記の測定で得られる波力の値の大部分は $(F_M)_{\max}$ となる。実験結果から式 (3) によって質量係数 C_M を求め、取水塔直径と波長の比 D/L との関係を示すと 図—4 のようになる。なお模型 A, B については積分上限値 $h+\eta$ を h とし、模型 C については積分上限値を取水塔の高さ h' とし、 C_M を算出した。実験値はかなりばらついていて、 C_M は 1.21~2.92 の範囲にある。

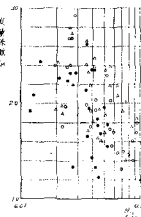
本実験で得られた質量係数の値を h/L , H/L , H/h との関係で示すとそれぞれ 図—5, 6, 7 のようになる。 C_M の値が h/L の増加とともに減少する傾向は合田りの鋼管杭の実験でも指摘されているが、 C_M の値はさらに H/L , H/h のいずれが増加しても減少する傾向にある。また



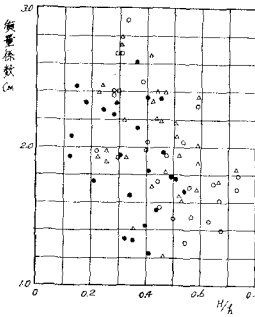
図—4 取水塔の質量係数 (D/L) と C_M の関係



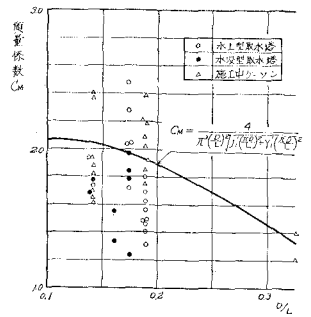
図—5 取水塔の質量係数 (h/L) と C_M の関係



図—6 取水塔の質量係数 (H/L) と C_M の関係



図—7 取水塔の質量係数 (H/h) と C_M の関係



図—8 取水塔の質量係数 (D/L) と C_M の関係、 $H/L > 0.04$ の場合

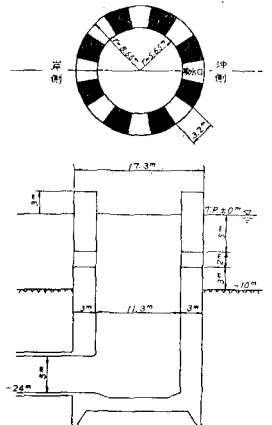
H/L , H/h が増加すると C_M の値の散乱幅も小さくなっている。なお C_M の値が H/L の増加とともに減少する傾向は吉川らの実験結果においても認められる。

取水塔の設計外力としては波高の大きい場合の波力を考えるわけであるから、実際の設計に用いる C_M の値としては波高の大きい場合の実験値を用いればよいと考えられる。また本実験におけるような取水塔模型の滑動から波力を求める方法では、波高が小さいほど作用する波力が小さく滑動の瞬間を見誤るおそれがあり、このため H/L , H/h の値の小さいところで C_M の散乱幅が大きくなっているとも考えられる。そこで、 $H/L \geq 0.04$ の場合についてだけ D/L と C_M の関係を示すと 図—8 のようになり、この図から判断して側面に取水口の設けられている円柱状取水塔でも質量係数の値として式 (4) を用いて波力を算定してさしつかえないと考えられる。

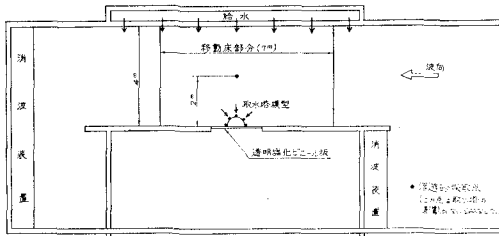
3. 取水塔周囲および内部の浮遊砂濃度

波により浮遊された多量の砂が取水塔内へ入って導水トンネル内を流送される可能性があるが、陸上に設けられる沈砂池の大きさを決定したり、復水器の損耗の程度を見積もったりするためには、取水塔への浮遊砂の流入状況を把握し、砂の流入を減少せしめる処置を行なう必要がある。そこで取水塔周囲および内部の浮遊砂濃度を調べる実験を行なった。

実験は 図—9 に示す取水塔の 1/25 の模型の片側半分を 図—10 に示すように配置して行なった。模型海底に敷いた砂の粒径加積曲線は 図—11 に示すとおりで、 $d_{50} = 0.13 \text{ mm}$ である。この

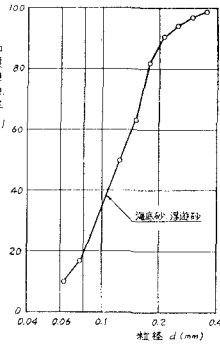


図—9 実験を行なった取水塔形状



図—10 取水塔内部および周囲の浮遊砂濃度を測定したときの模型配置

種の現象については近年多くの研究が行なわれているが、まだ解明されていない点が多く、小規模の模型実験結果から実際現象を推定するのはきわめて困難である。そこでこの実験では取水塔周囲および内部の浮遊砂濃度の外に、取水塔の影響を受けないと考えられる点(図—10 参照)でも浮遊砂濃度を測定し、相互の比較を行なった。実験条件は水深 24 cm~44 cm, 海底勾配

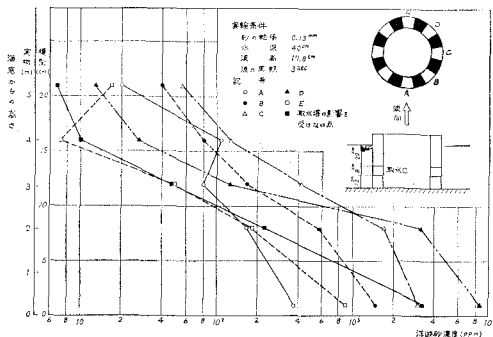


図—11 実験に使用した砂の粒径加積曲線

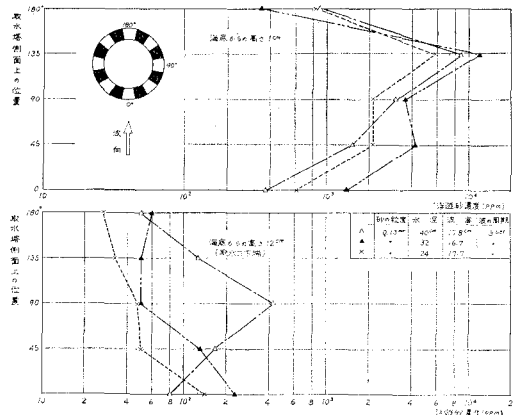
1/100, 波高 10 cm~24 cm, 周期 1 sec~3 sec, 取水流量 5.3 l/sec である。浮遊砂の採取は内径 3 mm の真鍮管にビニール管を接続したサイフォンによって行なった。

取水塔周囲の浮遊砂濃度は各取水口中心の前面 3.5 cm のところで測定した。なおこの実験では取水塔周囲の海底変化が実験結果に影響するのを避けるため、実験中にかなりの海底変化が認められれば、造波機を停止し砂を平坦に敷き均らした後、再び実験を行なう方法をとった。

測定結果の一例は 図—12 に示すとおりで海底付近では D 点の浮遊砂濃度が最も大きく、C 点、B 点の順に小さくなり、A 点、E 点では D 点の $1/10 \sim 1/10^2$ 程度になる。円柱側面に沿う水粒子最大速度はポテンシャル理論によれば $\theta = \pi/2$ すなわち C 点で最大となるが、この点



図—12 取水塔周囲の浮遊砂濃度の鉛直分布 ($d_{50} = 0.13$ mm の場合)



図—13 取水塔周囲の浮遊砂濃度の水平分布 ($d_{50} = 0.13$ mm の場合)

より岸側の D 点付近で浮遊砂濃度が最大となるのは質量輸送によるものであろう。

海底からの高さ 1 cm および 12 cm (取水口下端) での浮遊砂濃度が取水塔側面でのどのように変化しているかを示したのが 図—13 で、上に述べたように高さ 1 cm では $\theta = 135^\circ$ で浮遊砂濃度が最も大きい、高さ 12 cm では浮遊砂濃度が最も大きくなる点は条件により異なるようである。取水塔側面に取水口が全くなければ、高さが異なっても、海底付近と同様な水平濃度分布になると考えられるので、高さ 1 cm と高さ 12 cm の水平濃度分布の違いには波の通過にとまらぬ取水口への水の流入、取水口からの水の流出がかなり影響していると考えられる。

取水塔内の浮遊砂濃度は取水塔模型に接続して設けた取水トンネル模型内に採砂管を挿入して測定した。取水塔内の浮遊砂濃度を取水塔の影響を受けない点での取水口と同じ高さの浮遊砂濃度と比較して示した一例は 図—14 である。なおこの図の海底における水粒子最大速度は取水塔の影響を受けない点での値である。ここに示していない実験結果をも考慮すると取水塔内の浮遊砂濃度は取水塔の影響を受けない点での取水口と同じ高さの浮遊砂濃度の 2~4 倍となっている。

取水塔内の浮遊砂濃度が、取水塔の影響を受けない点での取水口と同じ高さの浮遊砂濃度より大きいのは海底における取水塔側面に沿う水粒子速度が、特に $\theta = \pi/2$ 付近で非常に大きく、このため多量の砂が浮遊されるためと考えられる。ポテンシャル理論によれば $\theta = \pi/2$ の海底での水粒子最大速度は取水塔の影響を受けない点の海底での水粒子最大速度の 2 倍となる。

取水塔内への浮遊砂の流入を軽減する方法として、取水口の敷高に合わせて突出部を設け取水塔側面付近の海底から浮遊した砂をいくらかでも取水口からそらす方法が考えられる。ここでは幅 6 cm の円環状突出部を取水

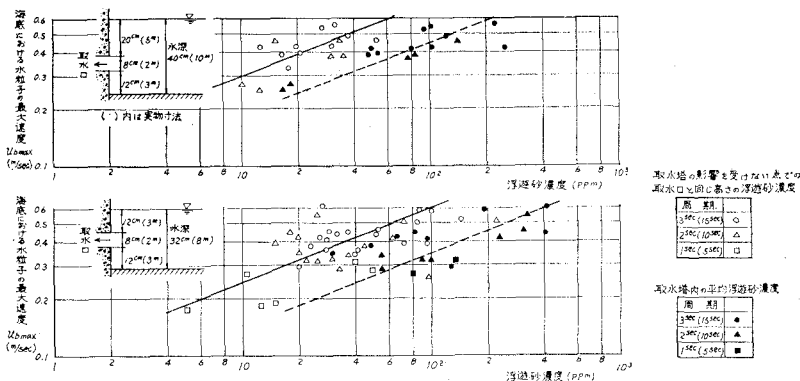


図-14 取水塔内の浮遊砂濃度および取水塔の影響を受けない点の取水口と同じ高さの浮遊砂濃度

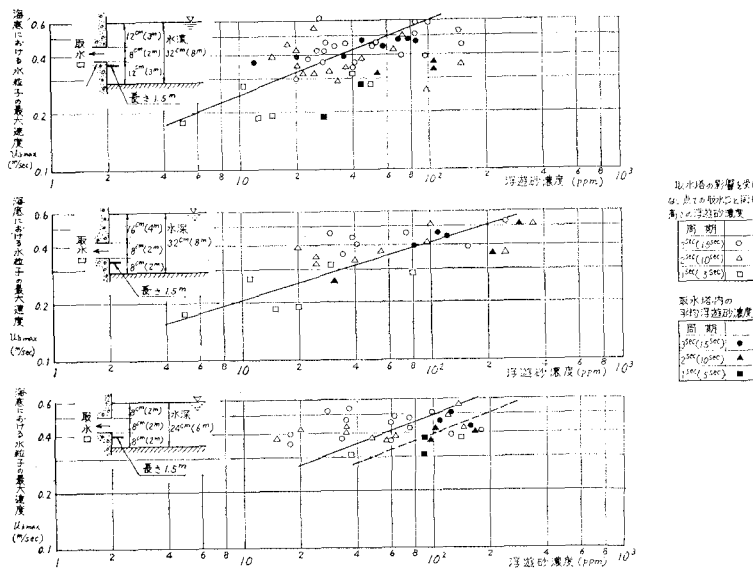


図-15 取水塔内の浮遊砂濃度および取水塔の影響を受けない点の取水口と同じ高さの浮遊砂濃度 (円環状突出部を設けた場合)

塔の周囲全体にわたり取水口の敷高に合わせて取付け、取水塔内の浮遊砂濃度を測定した。測定結果を同時に測定した取水塔の影響を受けない点での取水口と同じ高さの浮遊砂濃度と比較して示すと 図-15 のようになり水深 32 cm の場合は両者はほぼ同じ範囲に散乱し、水深 24 cm の場合は取水塔内浮遊砂濃度がやや大きい。この実験結果からみて取水口の敷高に合わせて取付けた円環状突出部は浮遊砂流入軽減に非常に効果があることがわかる。

4. む す び

冷却水取水塔に作用する波力ならびに取水塔周囲の浮遊砂について実験結果を述べたが、大直径円柱体の周りの海底変化、浮遊砂については従来あまり研究例がなく今後も検討したいと考えている。また、本地点は海底勾配が緩い上に取水塔の水面からの高さが低かったために予備計算ならびに実験結果から判断して、衝撃破波力が

作用したとしてもその全波力に対する割合はわずかであろうと考えた。しかし海底勾配が急になれば当然衝撃破波力を考慮する必要がある、この点についても検討したいと考えている。なお東大の堀川教授、港研の合田波浪研究室長から有益な御意見をいただいたことを記し、感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 海中構造物の設計波力について, 土木学会誌 Vol. 50, No. 2, 1965.
- 2) Wiegel, R.L.: Oceanographical Engineering, 1964.
- 3) 森平・柿崎・菊谷: 異形ブロックの波力に関する研究, 港研報告 Vol. 6, No. 4, 1967.
- 4) 合田良実: 構造物に働く波力, 水工学に関する夏期研修会講義集 B, 1967.
- 5) 吉川・河野・滝口: 円柱に働く波力について, 土木学会第 26 回年次学術講演会講演集, 1971.
- 6) 中村・阿部: 外海の冷却水取水塔に作用する波力に関する検討, 電研報告 71541, 1972.
- 7) 中村・阿部: 外海の冷却水取水塔の水理に関する検討, 電研報告 71065, 1972.