

入射角を考慮したカーテンウォール式防波堤の 設計波力について

関本恒浩*・近藤浩右**・大下哲則*
今井澄雄***・中村光宏****

1. ま え が き

取水量の多い火力あるいは原子力発電所では、取水口構造物としてカーテンウォール式防波堤が採用されることが多い。また、比較的大きな港湾あるいは漁港内で船舶の停泊を目的とするような場所でも波除堤としてカーテンウォール式防波堤を採用することがある。これらの場合、カーテンウォール式防波堤は港湾内構造物として建設されるので、堤体への入射角は比較的小さい範囲に限定されるのが一般的である。したがって、入射波の波向きと作用波力の関係を明確にすることが、合理的な設計を行う上で非常に重要となる。カーテンウォール式防波堤に斜め入射波が作用するときの水理特性に関する研究は、最近中村ら¹⁾によるわき出し分布法を用いた検討が行われているものの設計波力を考えるには十分といえないのが現状である。

本研究では、平面造波水槽を用いた種類の水理模型実験と既存の港湾における現地調査を実施するとともに境界積分方程式による数値計算を行って、波が斜めに入射するときのカーテンウォール式防波堤に作用する波力特性を種々の角度から検討し、斜め入射波に対する設計波力算定手法を明らかにすることを目的とした。

2. 水理模型実験および現地調査

2.1 水理模型実験（斜め入射波実験）

長さ 34 m、幅 5 m、高さ 1.2 m の不規則波造波水槽を用いて、容量式波高計および超小型波圧計により、入・反射波、透過波、堤体直前・背面水位変動および堤体に作用する波圧を測定した。堤体模型は、鋼製の架台に合板製の遮水板を取り付けたものを用いた。実験に当っては、カーテンからの反射波が水槽内で多重反射を起こさぬよう、入射角に応じて導波板ならびに消波壁を適切に配置し、条件の安定を図った。図-1 は、実験の諸

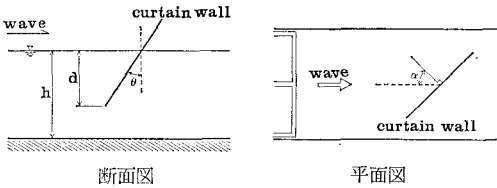


図-1 実験諸元

元を示したもので、 α は入射角、 θ はカーテンウォールの傾斜角、 d はカーテンウォールの水没深さおよび h は水深を表す。実験条件は、 α については $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° 、 θ については $0^\circ, 20^\circ$ および 45° 、 d/h については 0.4 と 0.6 に変化させ、波高 5 cm、8 cm および 10 cm、周期 1.0 s、1.5 s、2.0 s および 2.5 s の規則波ならびに有義波高 8 cm、有義波周期 1.0 s、1.5 s および 2.0 s の不規則波を作用させて、合計規則波約 170 ケース、不規則波約 60 ケースの実験を実施した。実験水深は、全ケースを通して 60 cm で一定とした。

2.2 現地調査

新潟県柏崎市の東京電力(株)柏崎・刈羽原子力発電所専用港湾において、冬期季節風による高波浪を対象として昭和 61 年 1 月 10 日～2 月 24 日の期間に、図-2 に示す取水口カーテンウォールの中央部でカーテンウォール直前・背面の水位変動と堤体に作用する波圧を測定した。波圧の測定は、波圧計 8 台をカーテンウォール前背

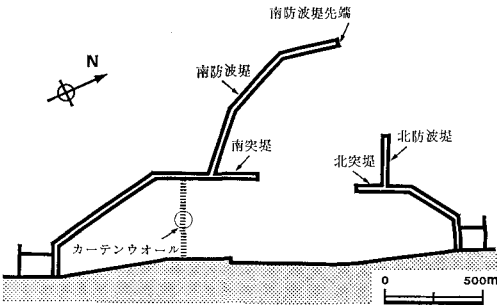


図-2 港湾形状および計測位置

* 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部
** 正会員 工修 五洋建設(株)技術部技術企画課
*** 正会員 東京電力(株)柏崎・刈羽原子力建設所
**** 正会員 工修 東電設計(株)原子力土木設計部

面に4台ずつ配置して行った。また、2台1組の容量式波高計を0.6m間隔で7地点に設置し堤体直前・背面の水位変動と波圧との関係を調べるのみならず、空間的な水位変動の変化についても観測を行った。

2.3 水理模型実験(平面実験)

長さ40m、幅30mの平面造波水槽に現地調査を行った柏崎・刈羽原子力発電所専用港湾の1/80模型を製作し、堤体直前背面の水位変動と堤体に働く波力の測定を行った。作用させた波は、Bretschneider-光易型スペクトルおよび現地観測スペクトルを近似したJONSWAPスペクトルの2種類の周波数スペクトルを有する不規則波である。水位変動の測定は容量式波高計を用いて行い、波力の測定は、波力測定用に他の部分と切り離れたカーテンウォールを鋼製のアームでささえ、波の作用によって生ずるアームの歪を測定することにより行った。

3. 数値計算

数値計算は、Liu and Abbaspour (1982)²⁾の示した境界積分方程式法(BIEM)を斜め入射波にも適用できるよう拡張して用いた。

Liu and Abbaspourの方法は、図-3に示すように計算領域をカーテンウォール前面側(領域I)と背面側(領域II)の2つの領域に分割することにより、カーテンウォール部分の取り扱いを非常に簡単にするものである。この他の特徴として、カーテン下端の特異性を形状関数に取り入れて、精度の向上を図っていることがあげられる。Laplaceの方程式に対する積分方程式は次式により表わされる。

$$\frac{C_j}{2\pi} f(x_j, z_j) = \int_{\Gamma_j} \left[f^* \frac{\partial f}{\partial n} - f \frac{\partial f^*}{\partial n} \right] ds; \quad j=1, 2 \quad (1)$$

ここで、 Γ_j は各領域の境界、 C_j は (x_j, z_j) における内部角、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は境界外向き法線方向微分である。直角入射のみを考慮する場合 f は、時間項を分離した後の速度ポテンシャルを表わす。つまり、 Φ を速度ポテンシャルとすると、

$$\Phi(x, z; t) = f(x, z) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

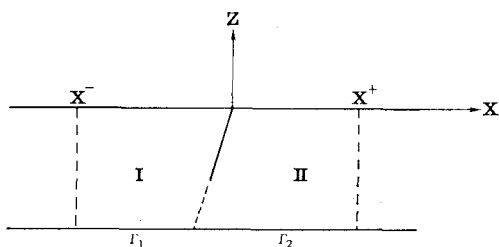


図-3 計算領域

であり、また、 f^* はLaplaceの方程式のGreen関数で、次式となる。

$$f^* = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r} \quad (3)$$

式(1)の積分方程式を次の境界条件のもとに解くことにより、カーテンウォールまわりの波の変形が求められる。

水面における条件は、

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \frac{\sigma^2}{g} f \quad (4)$$

水底および堤体上は、

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

仮想境界面では、

$$f = f^*; \quad x = x^+ \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \frac{\partial f^*}{\partial n}; \quad x = x^+ \quad (7)$$

である。ただし、 f^+ および f^- は式(8)および式(9)により表わされる。

$$f^+ = A_0^+ \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ikx^+} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^+ \frac{\cos K_n(z+h)}{\cos K_n h} e^{-K_n x^+} \quad (8)$$

$$f^- = A_0^- \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-ikx^-} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^- \frac{\cos K_n(z+h)}{\cos K_n h} e^{K_n x^-} + f_I \quad (9)$$

ただし、 K_n は分散関係式の n 次虚数解で、 f_I は入射波の速度ポテンシャル、 A_0^+ は伝達波および反射波の振幅、 A_n^+ は減衰の定常波の振幅を表わす。したがって、仮想境界上では未知数を f^* から A_0^+ 、 A_n^+ に変換を行い積分方程式を組み立てることになる。

本研究では、上に示したLiu and Abbaspourの方法を井島ら³⁾と同様の手法で斜め入射波に適用できるように拡張した。堤体を堤体法線方向には断面の変化しない無限長のものと仮定することによって、3次元のLaplace方程式は、2次元のHelmholtz方程式に減ずることができ、このときの積分方程式は、やはり式(1)で表わされる。このとき、 y 軸を堤体法線方向にとるものとする f は次式によって定義される。

$$\Phi(x, y, z; t) = f(x, z) \exp[i(ky \sin \alpha - \omega t)] \quad (10)$$

また、 f^* はHelmholtz方程式のGreen関数となり、

$$f^* = \frac{1}{2\pi} K_0(kr \sin \alpha) \quad (11)$$

である。ここで K_0 は変形Bessel関数である。したがって式(1)の積分方程式を式(4)から式(7)の境界条件のもとで解くことにより、斜め入射波が作用したときのカーテンウォールまわりの波の変形が求められる。た

だし、式 (8), (9) は本研究では次式のようにした.

$$f^+ = A_0^+ \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp(ikx^+ \cos \alpha) \quad \dots\dots (12)$$

$$f^- = A_0^- \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp(-ikx^- \cos \alpha) + f_I \quad \dots\dots (13)$$

4. 実験結果と数値計算結果との比較

図-4 は、不規則波実験結果と数値計算結果より、一例としてカーテンウォール傾斜角 $\theta=20^\circ$ のときの通過波と波力の関係を示したものである。図の縦軸は、波高で無次元化した平均波圧強度で、ここではカーテンウォールに作用する平均波圧強度 $\bar{p}$ と本実験に先立って計測した堤体設置位置における水位変動 η より、スペクトル解析を用いて両者のパワーを比較し次式で求めた。

$$\frac{\bar{p}}{w_0 H} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_{pp}}{P_{\eta\eta}}} \quad \dots\dots (14)$$

ここに、 P_{pp} および $P_{\eta\eta}$ は、それぞれ平均波圧強度および通過波水位変動のパワースペクトルである。また、横軸の L は、微小振幅波理論による成分波の波長をとっている。本実験では、実験水槽の制約から入射角が小さい場合、模型端部と計測位置との距離を十分確保できなかったため、実験値に端部からの散乱波の影響が現れた。 $\alpha=30^\circ$ の場合、 $h/L=0.2$ 付近で実験値と計算値との間に大きな違いがみられるが、これはその影響と考えられる。それ以外のところでは、実験値、計算値とも α が大きくなるに従い波力が小さくなっており、両者の

対応はほぼ良好である。ただし、 $\alpha=90^\circ$ の完全沿い波条件では、実験値と計算値が大きく異なり、実験値の方が大きな値を示した。また、カーテンウォールの傾斜角が 45° の場合は、波の遡上現象が大きく、実験値と計算値の対応があまり良好でない。

図-5 は、 $\alpha=45^\circ$ の場合について平均波圧強度とカーテンウォール前・背面水位差 $\Delta\eta$ のパワーの比の平方根を無次元化したものを相対水深に対して示したものである。波力と水位差の関係については、 $\theta=45^\circ$ を除いて実験値と計算値の対応が非常に良いことがわかる。 $\theta=45^\circ$ の場合の不整合性は、前述の波の遡上の影響により実際の水位が波力に対して有効な水位よりも大きく現われることによるものと考えられる。これを除けば、波力と水位差の関係は、入射角に関係なく、 $\alpha=90^\circ$ の場合にも実験値と計算値との整合性が確認された。また、この関係は、入射角の影響をあまり受けず、BIEM の計算結果によれば、 $\theta=0^\circ$ の場合は、 $\alpha=0^\circ$ から 90° まではほぼ一本の曲線に一致し、 $\theta=45^\circ$ の場合でも、 $\alpha=0^\circ$ のときと 90° のときの差は、5% 程度である。実験値についても同様に、 α の変化によるデータのばらつきは非常に小さく、測定精度の範囲内となっている。

図-6 および図-7 は、平面水槽実験結果と現地観測結果について、水位差と波力の関係を示したものである。データの整理方法は、前述の方法と同じであるが、現地観測では波圧計の取り付け上の制約から水位差測定位置と波圧測定位置が約 3.5 m 離れ、各回の観測結果にばらつきが多かったため、8 回の観測結果の平均をとっ

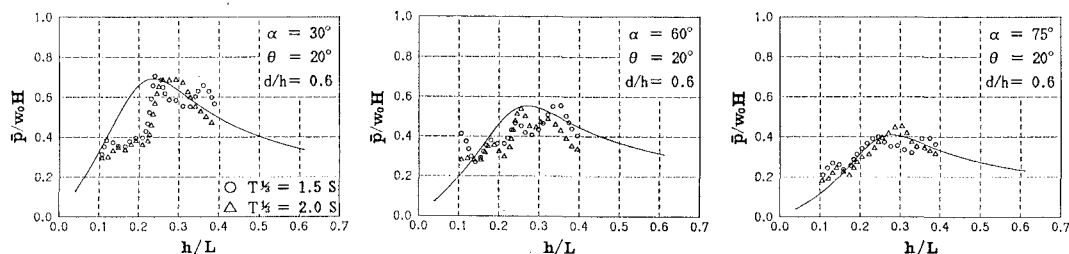


図-4 通過波と波力の関係

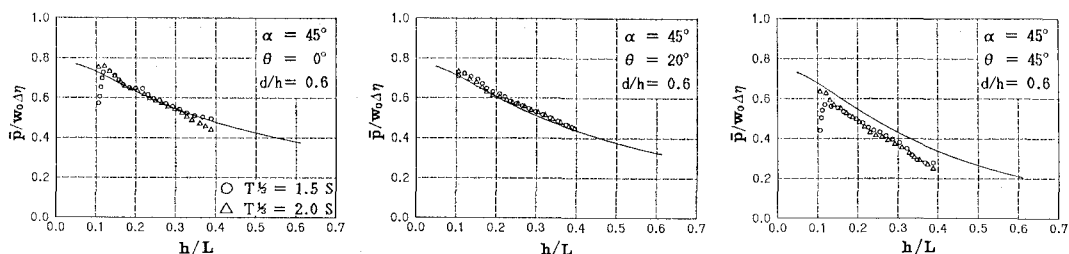


図-5 カーテンウォール前・背面水位差と波力の関係

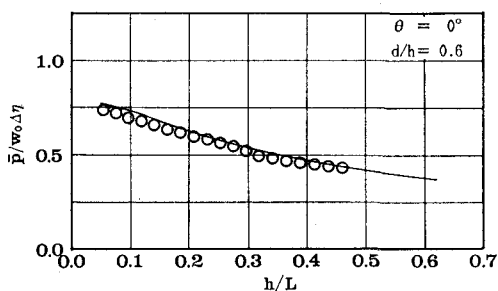


図-6 前・背面水位差と波力の関係(平面水槽実験)

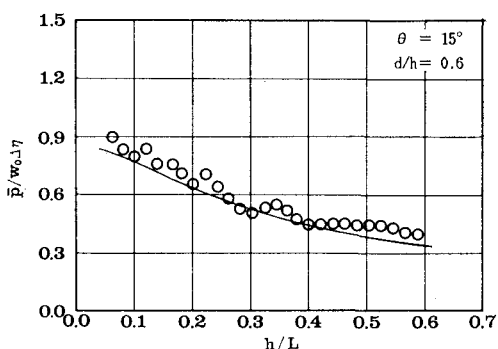


図-7 前・背面水位差と波力の関係(現地観測)

た。平面水槽実験および現地調査結果においても、先に述べた関係が成り立っていることが認められる。このことは、カーテンウォール直前・背面の水位差を正確に見積れば、水位差と波力の関係に関しては BIEM によ

り精度の良い評価が可能となることを意味している。また、波力と水位差の関係は、入射角の影響を受けにくいことから、入射角の効果は主に水位差の中に現れることがわかる。

次に、カーテンウォール前・背面の水位差について検討を行う。水位差は、前面水位振幅、背面水位振幅および前・背面水位変動の位相差に分解することができるが、ここでは、カーテン端部で発生する散乱波の影響が現われにくい、位相差と前・背面水位振幅比を対象とする。図-8 は、 $\theta = 20^\circ$ の場合について、前・背面水位の位相差と相対水深の関係を示したものである。位相差は、入射角が大きくなるにつれてだんだん小さくなっていく。これは、位相の反転する位置が α が大きくなるに従い、 h/L の大きい方へ移動することとも考え合せると、斜め入射波の場合カーテンウォール法線直角方向の見かけの波長が実際の波長より長くなることに起因すると考えられる。実験値にばらつきはあるものの、実験値と計算値との対応は平均的に良い。

図-9 は、背面水位振幅 η_r と前面水位振幅 η_f の比 η_r/η_f と相対水深の関係を示したものである。 $\alpha = 30^\circ$ の場合、計算値と実験値の対応は良好であるが、 α が大きくなるに従い両者の不整合性が顕著となっている。計算値は、 α が大きくなるに従い、 η_r/η_f も大きくなるのに対し、実験値はいつも $\alpha = 30^\circ$ の場合に対する BIEM の計算値に近い。このような傾向は、 h/L の小さい領域つまり波長の長い領域で顕著となっていることから、その原因として沿い波の発生あるいはカーテンウォール下部からの回折波の影響が考えられるが、これらを定量

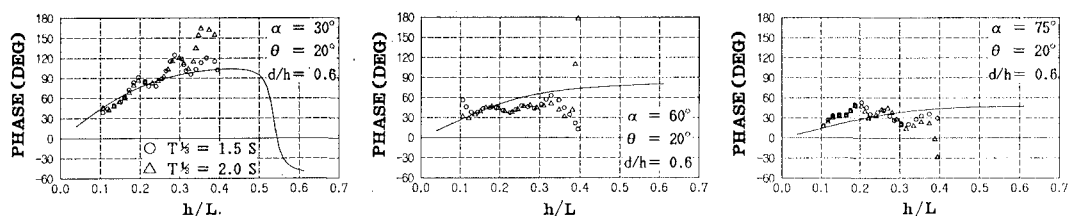


図-8 カーテンウォール前・背面水位の位相差

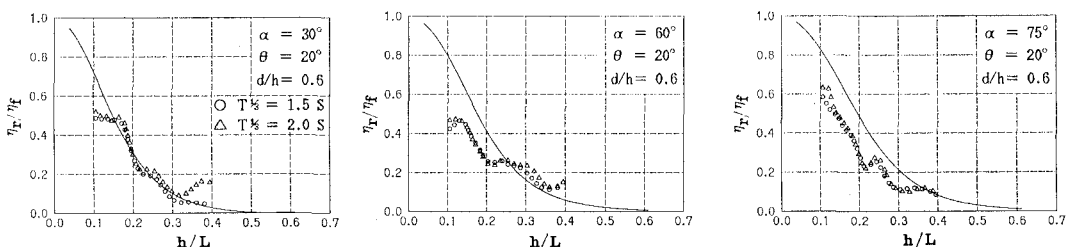


図-9 カーテンウォール背面水位振幅と前面水位振幅の比

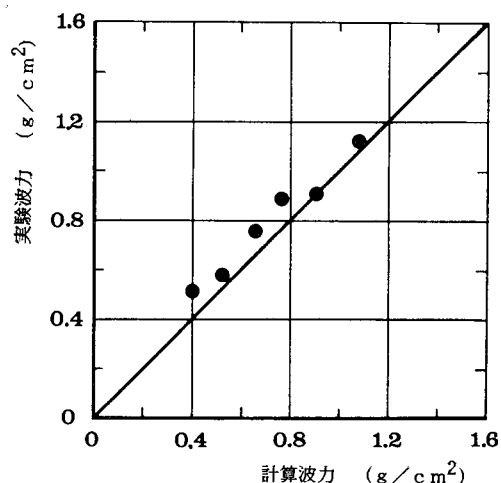


図-10 波力の実験値と計算値の比較

的に評価するには至らなかった。 α が大きくなるにつれ η_r/η_f の計算値が実験値を上回ることより、この結果として、前・背面の水位差については計算値が過小評価となるものと推測されるが、図-4 からわかるように、通過波と波力の関係において実験値と計算値の対応は良好である。したがって、前・面水位振幅と前背面水位振幅比がそれぞれ計算値とのずれを相互に相殺し、前・背面水位差が比較的良好に見積られる結果になったものと推定される。

5. 設計波力

実際の不規則波を対象とし、設計波高として代表波を考える場合には、パワースペクトルを重み関数として、本研究で得られた BIEM による計算結果を荷重平均すれば良い。しかし、荷重平均前後での変化が小さいことや、数値計算に含まれる誤差等も考慮すれば、実用的には荷重平均によりピーク値を下げることをせず、本研究で示した BIEM による数値計算結果をそのまま用いる方が良いと考えられる。

図-10 は、本研究において示した 波力算定法と平面

水槽実験の結果を比較したものである。図の横軸は計算値を、縦軸は実測値を示している。計算波力の算定に当っては、Green 関数を用いた港内方向スペクトルの算定法⁴⁾により波力計測装置設置位置の波高・波向を求め、BIEMにより波力を算定した。実測値と計算値の対応は非常に良く、本研究において示した BIEM による波力算定の妥当性が確認できる。

6. おわりに

数値計算と水理模型実験を中心にカーテンウォール式防波堤に作用する波力特性についての検討を行った。その結果、比較的広い波浪・構造条件に対して、境界積分方程式法による数値計算により、良好な精度で波力の評価が可能であることが明らかとなった。また、平面実験や現地観測により本手法の実現象への適用性も確認できた。本研究では、カーテンウォール下端から発生する渦の影響は考慮しなかったが、相対水深の小さなところでこの効果は大きくなり、BIEMが波高の伝達率を過大評価することも確認されており、前・背面水位変動振幅の評価や波圧分布の評価に関して今後さらに詳細な検討が必要と考えられる。

最後に、本研究は東京電力㈱の取放水設備の水理設計に関する研究の一部として実施したものであることを付記するとともに、研究の実施に当り、御協力いただいた関係諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中村孝幸・森田知志・小野正順：斜波中における任意断面浮体まわりの波浪の変形，海洋開発論文集，Vol. 3, 1987.
- 2) Liu, P.L.-F. and Abbaspour, M.: A wave scattering by a rigid thin barrier, J. Waterway, Port, Coast. and Ocean Engrg. A.S.C.E., 108, pp. 479~491, 1982.
- 3) 井島武士・吉田明徳・北山 斉：斜め入射波に対する潜堤の反射効果に関する数値解析，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 418~422, 1982.
- 4) 近藤浩右・清水琢三・山田耕一：グリーン関数を用いた港内方向スペクトルの計算法，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 106~110, 1987.