

下部透過式カーテンウォール構造物に作用する波力特性について

興野俊也* ・ 榊山 勉** ・ 柴田 学***
中野 修**** ・ 大熊義夫*****

1. はじめに

火力・原子力発電所の取水口構造物は、深層からの低温な冷却水を取水するために、PC 遮水版を鋼管杭で支持し、下部に開口部を設けたカーテンウォール構造が主である。この構造は設計外力を構造部材の耐力や地盤支持力で負担する構造であることから、建設地点によっては経済性が影響される構造形式となっている。この構造の耐波設計は防波堤の設計に準じ、直立堤を対象とした合田式 (1973) を部分的に適用してきた。しかし、カーテンウォールは下部に水深の 30% 程度の開口部を有し、透過率の比較的高い構造であるため、周期が長くなると開口部からの透過により合田式に対する波力の低減が予測される。また、背後には護岸などがあるため、入射波と反射波が作用する複雑な波浪場となる。森平ら (1964) の報告でも水深波長比が 0.1 よりも大きい場合にサンプル式よりも低減する可能性が示されているが、実務的にはサンプル式を適用するものとなっている。そこで本研究では、波力低減による合理的な構造設計を目的に、下部透過構造物に作用する波力特性を明らかにするために水理模型実験を実施し、波力低減効果を明らかにした。また、波・流れが作用する複雑な条件下での波圧特性や流速場を把握することが可能な VOF (Volume Of Fluid) 法に基づく 2 次元波動場数値解析を実施し、下部透過構造物の波力低減機構について考察を行った。

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

実験に使用した造波水路は、(財)電力中央研究所所有のもので、長さ 51 m × 幅 0.9 m × 高さ 1.2 m の吸収式不規則波造波装置付きの 2 次元水路である。実験縮尺は 1/25 とした。実験ではカーテンウォールに作用する波力特性を検討することを目的に、規則波および不規則波を作用させた。図-1 に実験装置を、図-2 にカーテンウォール

ル模型を示す。なお、以下の文中に示す数値は、実機換算値を示す。カーテンウォール模型は、開口高を 2 種類 (5.0 m, 6.5 m (開口高 d /水深 $h=0.35, 0.45$)), 天端高を 2 種類 (HWL ± 0.0 m, +1.5 m) に変化させた。また背面構造物が無い場合とカーテンウォールの 100 m 後方に背面構造物がある場合のそれぞれの波力特性の影響を調べた。波浪条件は、水深波長比が 0.09~0.18 程度になるように 4 種類の周期 ($T=8, 10, 12, 14$ s) の規則波を選び、波高を 4 種類 ($H=1.0, 1.8, 2.5, 3.1$ m) に変化させた。不規則波の場合は有義周期を 1 種類 ($T_{1/3}=14$ s) とし、有義波高を 2 種類 ($H_{1/3}=1.0, 1.7$ m) に変化させた。また、カーテンウォール前背面には計 8 台の波高計を設置した。カーテンウォールに作用する波力は図-2 に示すように、水路床下に設置した 2 分力計により水平波力 (前面波力と背面波力の差分) を測定すると同時に、カーテンウォール模型前背面に設置した計 14 台の波圧計により波圧を測定し、得られた波圧を積分して

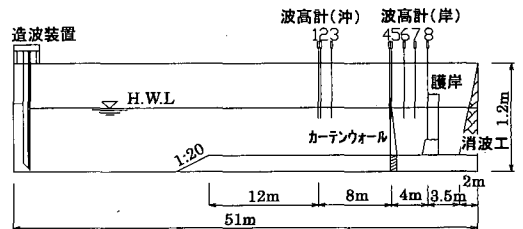


図-1 実験装置

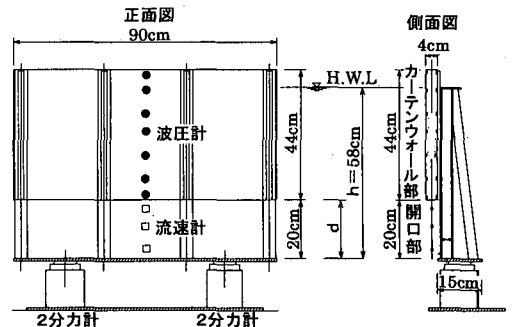


図-2 カーテンウォール模型図

* 正会員 東京電力(株) 電力技術研究所
** 正会員 工 博 (財)電力中央研究所 水理部
*** 正会員 工 修 東京電力(株) 常陸那珂火力建設所
**** 正会員 修(工) 東電設計(株) 第二土木本部 火力土木部
***** 正会員 東電設計(株) 第二土木本部 火力土木部

前面波力および背面波力を求めた。

(2) 実験結果および考察

a) 波力の時系列

2分力計から得られた水平波力 (F_L) の時系列と波圧計の値を積分して得られた前面波力 (F_f) と背面波力 (F_r) の差の時系列を比較したところ両者はほぼ一致していたので水平波力は2分力計から、波圧分布は波圧計から求めた。図-3にカーテンウォール天端高HWL+1.5m, 開口高5.0m, 背面構造物無における $H=1.8$ mの規則波を作用させた波力時系列の例を各周期ごとに示す。カーテンウォールに作用する波力は、まず水平波力 (F_L) が最大となり、やや遅れて前面波力 (F_f) が、その後背面波力 (F_r) が最大となる傾向である。水平波力と前面波力の位相差は、 $\Delta t=0.02T\sim 0.05T$ 程度であり、水平波力と前面波力の位相差は殆どないといえる。また、前面波力と背面波力の位相差は、 $\Delta t=0.11T\sim 0.22T$ 程度あり、周期が長くなると位相差が減少する傾向にある。これは周期が長い場合に開口部から透過し易いことを示している。また、水平波力は、周期が長くなると波力が低減する傾向にある。これは前面波力の増加は少ないのに、背面波力が増大し水平波力が低減する結果であり、開口部からの透過による効果と考えられる。背面構造物がある場合については、水平波力と前面波力の位相差は $\Delta t=-0.06T\sim 0.02T$ 程度で殆んどないといえるが、前面波力と背面波力の位相差は、背面構造物からの反射波の影響により $\Delta t=-0.52T\sim 0.31T$ の範囲で周期により大きく変動していた。

b) 波圧分布

図-4にカーテンウォール天端高HWL+1.5m, 開口高5.0m, 背面構造物無における $H=1.8$ mに対して $T=8$ s, 14sの規則波を作用させた場合の前面波力が最

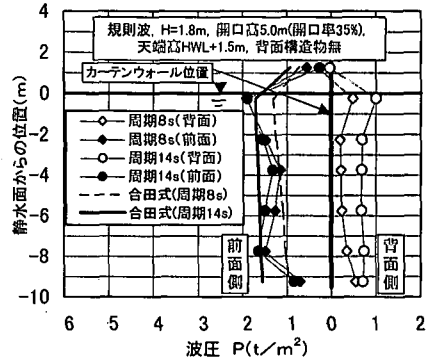
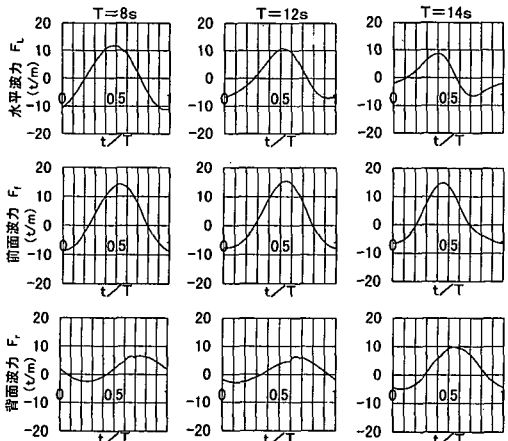


図-4 前面波力最大時における前背面波圧分布

大となる時刻の前背面波圧分布を示す。図中には合田式により計算した前面波圧分布も併せて示した。前面波圧分布は合田式の波圧分布と異なり、両ケースとも上部・中央部・下部の波圧が小さくなるような弓形の形状を示し、特に開口部からの透過があるために開口部付近の波圧が小さくなっている。 $T=8$ sと14sについて波圧を比較すると、前面波圧は中央部において $T=14$ sがやや大きい上部・下部において値はほぼ同じとなっている。これに対して、前面波力最大時の背面波圧は周期の長い $T=14$ sの方が周期の短い $T=8$ sに比べて、全体的に波圧が大きくなっており、 $T=14$ sでは最大で 1 t/m^2 (9.8 kN/m^2) 程度、 $T=8$ sでは 0.5 t/m^2 (4.9 kN/m^2) 程度作用している。したがって、前面波力と背面波力の差分である水平波力は、周期が長くなると小さくなる。合田式の波圧分布は周期が長くなると増大するため、前面波力および水平波力ともに周期が長くなると合田式に対して小さくなる傾向にある。

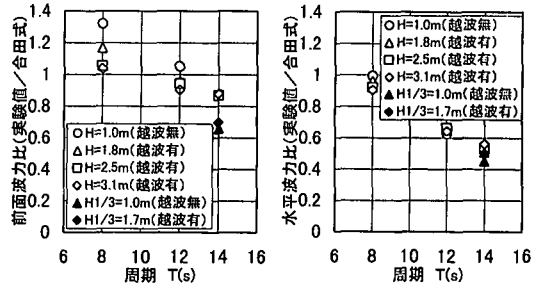
c) 合田式との比較

図-5にカーテンウォール天端高HWL+1.5m, 開口高5.0m, 背面構造物無における周期と波力比(実験値/合田式)の関係を示す。図中には不規則波の結果を併せて示した。前面波力比は、周期が短い $T=8$ sでは1.0を



($H=1.8$ m, 開口高5.0m(開口率35%), 天端高HWL+1.5m, 背面構造物無)

図-3 波力の時系列の例



(規則波, 開口高5.0m(開口率35%), 天端高HWL+1.5m, 背面構造物無)

図-5 周期~波力比(実験値/合田式)関係

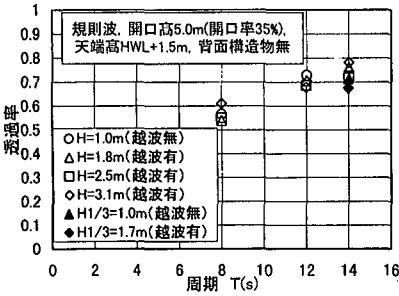


図-6 周期～透過率 関係

超えており波力の低減効果は見られないが、 $T=14$ sでは0.8程度の低減効果となっており、周期とともに線形的に低減する傾向であることが分かる。

波高レベルでの特性としては、 $T=8$ sでは波高が小さいほど波力比が大きくなる傾向にある。特に越波が生じていない $H=1.0$ mの前面波力比は、越波が生じた $H=1.8$ m以上の前面波力比に比べて大きいが、周期が長くなるに従い、この差は小さくなる傾向にある。

水平波力比も前面波力比と同様、周期の増大とともに低減する傾向であり、低減率も $T=12$ s以上の場合に0.6を示す結果となっている。水平波力比の波高による変動は、前面波力比と比べて比較的少ないが、 $T=14$ sでは両者とも波高の相異による差は殆んど生じておらず、周期による影響が支配的な傾向にある。また、不規則波の前面波力比および水平波力比は、規則波のそれに比べて低減している。

周期による影響をより明確にするために透過率との関係を調べた。図-6に同条件での周期と透過率の関係を示す。これより透過率は、波高の相異つまり越波の有無にはあまり依存せず、周期が長くなると増大する傾向にある。また、不規則波における透過率は規則波におけるそれよりも小さい傾向にある。これより周期が短い $T=8$ sでは、透過率が小さいため、波高の相異による波力の低減が若干みられるが、周期が長くなると、開口部による透過率が増加し、越波による影響は現れにくくなるものと推察される。合田式よりも波力が低減するのは、波高の相異による越波の影響は小さく、周期の増大に伴う開口部からの透過波による影響が支配的であると推察される。

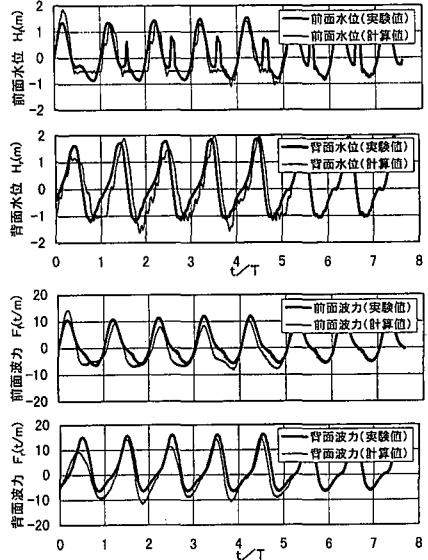
3. VOF法に基づく2次元波動場数値解析

(1) 解析条件

数値解析は、著者の一人が開発したVOF法に基づく断面2次元波浪場を対象とした構造物と波との相互作用を扱える計算モデル(PS-WAVE)に依ることとした(紳山・鈴木, 1998)。表-1に実験結果との比較ケースを示

表-1 PS-WAVEによる解析ケース

ケース No.	波種類	波高	周期	天端高	開口高	背面構造物
1	規則波	1.8 m	14 s	HWL+1.5 m	5.0 m	無
2			10 s			
3			10 s		6.5 m	有
4			14 s			



(規則波, $H=1.8$ m, $T=14$ s, 開口高50m(開口率35%), 天端高HWL+1.5m, 背面構造物有)

図-7 実験値と計算値の時系列比較

す。計算領域は水平方向に約930mとし、カーテンウォール位置は入射波境界から800mとした。計算メッシュは $\Delta x = \Delta y = 50$ cm, 時間間隔は $\Delta T = \text{周期}/1600$ とした。また、境界条件は背面構造物の無い場合にはカーテンウォール背後130mを進行波の放射境界、背面構造物がある場合には完全反射境界とした。

(2) 解析結果

a) 水位, 波力の時系列

ケース2(規則波, $H=1.8$ m, $T=14$ s, 開口5.0m, 天端高HWL+1.5m背面構造物有)についてカーテンウォール前面水位および前面波力の比較を図-7に示す。計算値と実験値の比較は、前面波力の時系列が定常になった状態でのゼロアップクロス点を同期させて行った。これによると前面および背面の水位・波力ともにピーク値・位相ともに計算値と実験値が良く整合している。実験値の前面水位では背面側からの越波によりピークが2つみられたが、数値計算では越波の影響は顕著でなかったためこのような現象は起こらなかった。

b) 波圧分布

ケース2での前面波力最大時の波圧分布を実験値と計算値で比較したものを図-8に示す。前面波圧は、中央部が減少する傾向は再現されていないが、カーテンウォー

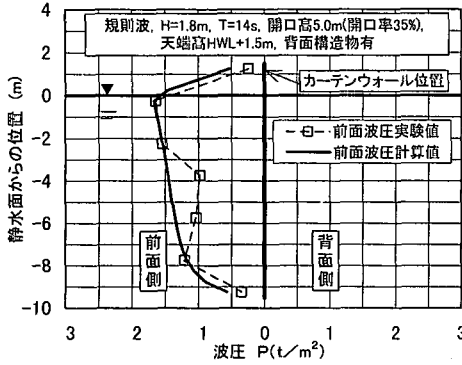


図-8 前面波力最大時の前面波圧分布の計算値と実験値の比較

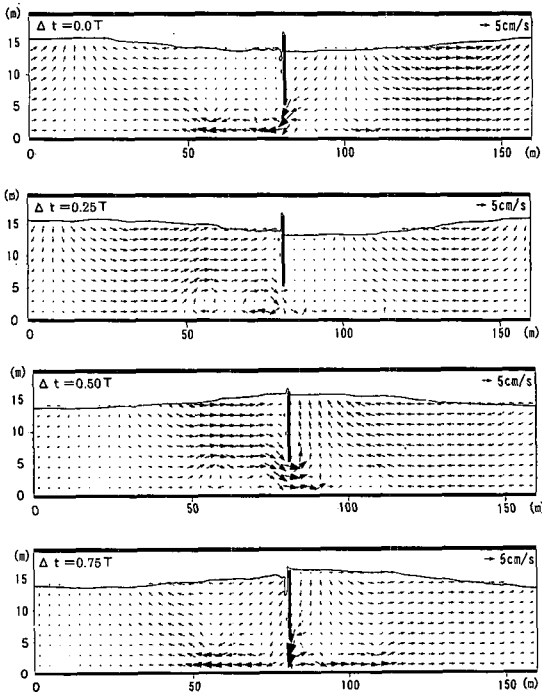


図-9 1周期における流速ベクトルの変化(ケース1)

ル上部および下部において波圧が小さくなる傾向は、実験結果と良く一致しており、全体的な波圧分布は一致しているといえる。また、波圧合力比(実験値/計算値)も0.85と高い精度で再現できており、解析手法の妥当性を確認した。

c) 流況分布

図-9に背面構造物が無い場合であるケース1の流速ベクトルを、図-10に背面構造物がある場合であるケース2の流速ベクトルを示す。両図とも前面水位が最小になった時刻 $t=157.5\text{s}$ から $\Delta t/T=0.25$ 刻みでの流速ベクトルの変化を示した。図-9では、押波時である $\Delta t=$

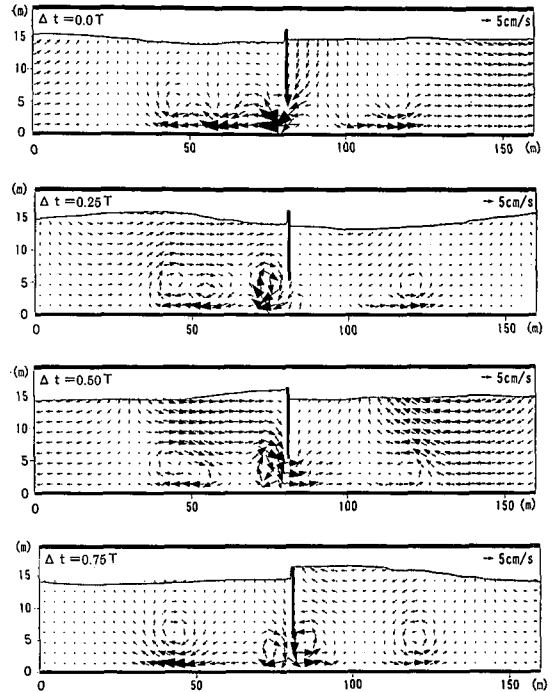


図-10 1周期における流速ベクトルの変化(ケース2)

$0.5T$ においては、カーテンウォール中段以深から開口部に流れる顕著な流速ベクトルが存在し、その流れがカーテンウォール背後で急速に水位上昇させるような鉛直方向の流れになっているのが分かる。また、その周辺で部分的に渦が生じる結果となっている。引波時である $\Delta t=0.0T$ では、押波時ほど顕著な流れは発生していないが、開口部から沖側の流れが発生していることがわかる。図-10では、押波時($\Delta t=0.5T$)、引波時($\Delta t=0.0T$)の流況は、図-9と比べ、カーテンウォール透過部周辺で常に渦を形成するほどの顕著なものとなっている。これは、護岸反射波により、前面水位と背面水位の位相差が図-9よりも顕著であることに起因しており、実験状況と同傾向を示した。

ケース1, 2におけるカーテンウォールに作用する圧力分布を把握するため、図-11に押波時($\Delta t=0.5T$)における圧力変動図を示す。ケース1では押波時に流速ベクトルの発達する範囲から開口部へ向けて圧力が低下する結果で、逆に背面側の圧力が上昇している結果が分かる。また、ケース2ではカーテンウォール前面での圧力変動がケース1より顕著となっており、開口部周辺での流況変化による影響が起因しているものと推察された。従って、前面波圧の低下は、開口部へ向かう流れにより生じているものと考えられる。

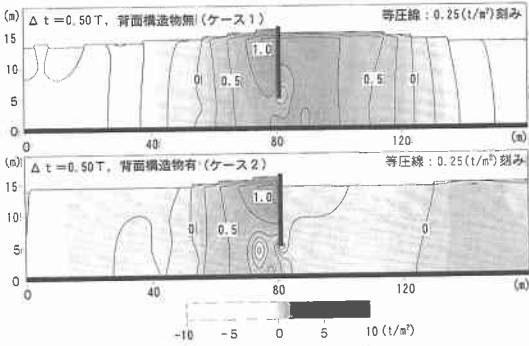


図-11 圧力変動分布図

4. 波力低減率の検討

水理模型実験結果では、合田式に対する波力比と周期の関係性を調べ、周期と共に減少することを確認したが、ここでは藤原ら(1996)にならない、アーセル数(HL^2/h^3)により波力比(実験値/合田式)を整理することとした。

図-12に背面構造物がない場合と有る場合について、アーセル数と波力比の関係性を示す。不規則波に関しては、 H_{max} 、 L_{max} が H 、 L に対応するものとして図示した。また図中には実験値と計算値に対し、前面波力比と水平波力比を示すとともに、規則波の実験値に対するこれらの回帰曲線も併せて示した。藤原ら(1996)によればケーソン堤に作用する前面波力に関して、アーセル数が30より大きい範囲で相対天端高 $h_c/H < 0.6$ では、合田式の80%程度の波力となるが、30以下の場合には波力比がほぼ1を中心に0.9~1.1程度に分布している結果となっている。今回の実験ではアーセル数が25程度より下の実験であるが、水平波力比および前面波力比ともにアーセル数の増加とともに緩やかに減少し一定値に近づく傾向にある。例えば、前面波力の回帰曲線からアーセル数が15程度では、背面構造物無および背面構造物有ともに0.85程度に低減されているのがわかる。これはケーソン堤の場合と異なり開口部からの透過による影響であると推察される。背面波力を考慮した場合に相当する水平波力比については、背面構造物からの反射波が有る場合でも前面波力比以下になっている。また、計算値は背面構造物の有無に関わらず、ほぼ実験値と整合している。

以上のことから、構造設計に際しては水平波力で設計が可能であるが、安全側の設計としては波力低減を考慮した前面波力を用いた設計を採用するのが得策であると考えられる。

なお、今回の低減率の適用に当たっては、本実験は碎波まで考慮していないため部分重複波領域に限定する。また波浪条件としては、アーセル数(HL^2/h^3)で15~30

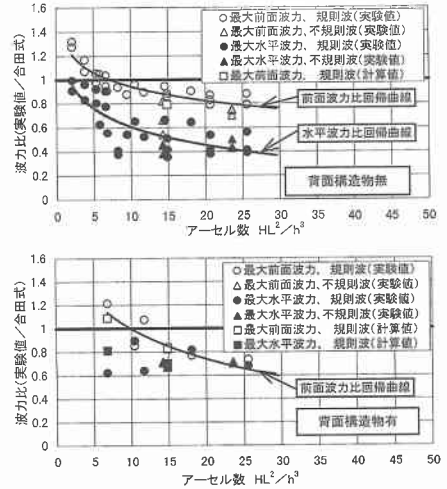


図-12 アーセル数~波力比(実験値/合田式)関係

程度、 d/h は0.45以下の条件に限定される。

5. まとめ

本研究によって明らかになった点を示す。

① 周期が長いほど開口部からの透過率が高くなるため、カーテンウォールに作用する波力は、開口部の流れおよびこれに伴う背面波圧の増加のため合田式より波力が低減する。

② 合田式に対する波力比はアーセル数により整理することができ、アーセル数の増加とともに緩やかに減少し一定値に近づく傾向にある。またアーセル数が15以上に対しては前面波力比は1より小さくなる。

③ VOF法に基づいた二次元波浪場数値解析(PS-WAVE)による波圧分布、波力の計算値は実験値とよく一致した結果を示した。また、計算結果から波圧の低下は、カーテンウォール下部から開口部へ向かう流れの形成により生じていることが確認できた。今後、同様の構造についてもこれらの手法で適切な波圧推定が可能であると考えられる。

参考文献

合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
 榊山 勉・鈴木一広(1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 566-570.
 藤原隆一・貝沼憲男・興野俊也・石崎崇志・小竹康夫・津田宗男(1996): 低天端ケーソン堤に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 761-765.
 森平倫生・柿崎秀作・合田良実(1964): カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, 第3巻, 1号, 27 p.