

急勾配斜面上の矩形放流構造物に作用する 波力に関する研究

榊 山 勉* ・ 田 中 寛 好**・ 山 下 正 義***
小笠原正治****・ 竹 中 秀 夫*****

1. 緒 論

火力、原子力発電所の放水口周辺では、温排水放流による流れ場の影響で波の変形が生じる。放水口の設置水深、放流方向と波向きとの関係によっては、放水流による流れと波との相互干渉により、放流構造物に作用する波力の増加や放流護岸への越波の増大が懸念される。さらに発電所の立地条件によっては、放流構造物を砕波帯内に建設する場合が生じる。このため、放水流による波浪変形を考慮した上で衝撃砕波力を評価する必要がある。

衝撃砕波力に関する研究は、合田ら(1966)により算定モデルが提案され、その後、堀川ら(1973)は比較的大口径の円柱を対象に実験的な検討を行っている。また、谷本ら(1986)は傾斜した円柱に作用する衝撃砕波力に関して、不規則波を含めた実験を行い算定モデルを提案している。これらの研究では円柱が中心であり、比較的大きな矩形構造物や波が流れの影響を受ける場合における衝撃砕波力に関しては検討されていない。

本研究では、温排水放流による波の変形特性を把握し、流れによる波高増加やそれに伴う波力の特性について、急勾配斜面上の矩形構造物を対象に検討を加える。

2. 実験方法と実験条件

実験は図-1に示す平面水槽(幅 22m, 長さ 50m, 深さ 1.5m)内に海底勾配 1/15 の一様勾配斜面を作製して行った。実験条件を表-1に示す。放流構造物の設置水深 $h_0=0.20$ m, 水槽内の一様水深 $h_1=0.58$ m である。周期 $T=1.20$ s, 1.70 s, 2.19 s の 3 種類で、非砕波から砕波後の波が構造物地点で生じる入射波を対象とした。放水流量 Q は 0.00465 m³/s (放水流速 $U=0.412$ m/s, 放水管直径 0.04 m $\times$ 9 本, 放水口全幅 2 m) であり、波向きに 0° から $\pm 45^\circ$ 方向に放流する水中放流である。放水口中心深さは $z=-0.14$ m である。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部
** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境総合推進室
*** 正会員 関西電力(株)建設部 次長
**** 正会員 工修 関西電力(株)建設部 課長
***** 正会員 工修 関西電力(株)建設部 土木課

放流水は常温水(水槽内水温と同一)と温水(水槽内水温との温度差 $\Delta t=7^\circ\text{C}$) の 2 種類の温度について行った。なお図-1に示すように水温計を設置して、水槽内の水温と温排水の水温を管理した。実験では先ず波がない状態での放水流の流速分布を詳細に測定した。次に、波のみの場合と放水流速場(常温水, 温水)での種々の入射波高について流軸($y=0$ m)上の岸沖方向の波高, 流速を図-1に示す位置で測定した。さらに、放流時の波高の平面分布を代表的な条件(周期 3 種類 $\times$ 波高 2 種類; 非砕波, 砕波)について調べた。

放流構造物は、温排水を均等放流するために海域へ放流する直前に一時的に貯留するものである。実際には放流構造物は放水管と接続されているが、本実験では全波力測定のため、放流構造物と管路系とを分離して模型を作製した。図-2に示すように放流構造物は 1 辺 0.60 m の正方形断面(構造物幅 $\cdot$ 波長比 $B/L=0.2\sim 0.4$)で、前面の天端高さは水深の 2 倍の 0.40 m とし、越波を可能な限り許さないようにした。3 分力計を用いて全波力を、また、同時に図-2(b)に示す構造物の中心の測線 No. 1 で波圧を測定した。さらに、構造物幅方向の波圧分布を前面(No. 1 から No. 5)と後面(No. 6 から No. 10)で周期 $T=2.19$ s の流れなしの場合に測定し、3 分力計による結果との比較を行った。データのサ

表-1 実験条件

CASE	周期 T (s)	水 深 h (m)	放流形態	入射波高 H_i (m)
N12	1.20	構造物 設置水深 $h_0=0.20$ m	流れなし	0.046-0.175
N17	1.70			0.049-0.159
N21	2.19			0.052-0.168
C12R	1.20	一様水深 $h_1=0.58$ m	常温水	0.043-0.181
C17R	1.70			0.051-0.151
C21R	2.19			0.056-0.148
W12R	1.20	温水*		0.072-0.208
W17R	1.70			0.049-0.188
W21R	2.19			0.057-0.167

放流流量 $Q=0.00465$ m³/s, *温度差 $\Delta t=7^\circ\text{C}$

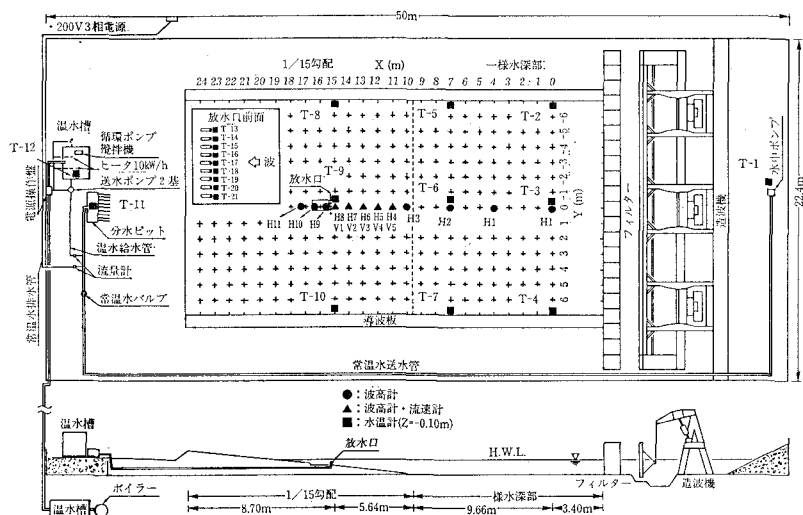


図-1 実験装置

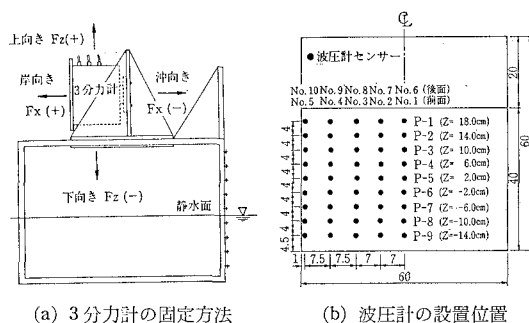


図-2 放流構造物模型

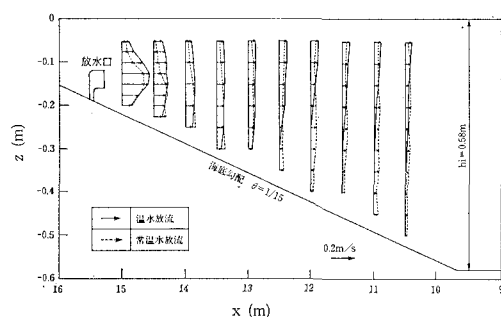


図-3 定常流速の鉛直分布

ンプリング周波数は 400 Hz とした。

3. 実験結果と考察

(1) 放流流速分布と波高変化

図-3 に放流構造物中心線 ($y=0$ m) 上の放流水の流速鉛直分布を示す。実線が温排水、点線が常温水の結果である。 $z=-0.14$ m の深さの放水口から放流された温排水は、密度が小さく浮上が速いため $x=14$ m 近傍で鉛直方向にほぼ一様になり、さらに $x=13$ m 当りから表層に集中する。一方、常温水では放水口近傍で流速の最大値が海底斜面に沿って下がっており、 $x=13$ m 当りから沖ではほぼ鉛直一様になっている。なお、流速の平面分布の測定結果と観察より、温水に比べ常温水の方が拡散範囲が狭く、流れが集中する傾向にあることが明らかになった。

図-4 は放水流場における波高の平面分布を、 $y=0$ m を中心に片側半面について測定した結果で、換算沖波波高 H_0 で無次元化して示した。入射波条件は構造物位置

で非碎波の場合である。放水流の影響により放流口前面の領域で波高が高くなっていることが分かる。また、流れのために波が屈折し、波峰線が湾曲することが観察された。(a) $T=1.20$ s では等波高比線が沖側に突き出し放水流がある場で波高が大きくなっている。(b) $T=2.19$ s では放水流の流軸が $y=0$ m から若干ずれたために等波高比線の沖側への凸部もずれている。流れのない場合の波高に比べて、放水口直前の流軸上での波高は (a) $T=1.20$ s で約 1.4 倍、(b) $T=2.19$ s では約 1.2 倍になっている。流れによる波高増加への影響は、周期が大きくなるにしたがって小さくなることが確認された。平面的な流れ場における波の変形に関しては、間瀬ら (1987) が数値計算法の開発を目的に検討しているが、実験により確認された例はほとんど見当たらない。波高増加への要因としては、逆流の効果や流速平面分布による屈折の効果の 2 つがあるが、これらの波高変化に及ぼす寄与率を定量的に評価するのは今後の課題である。

図-5 に波高の岸沖変化の 1 例を示した。流れがない

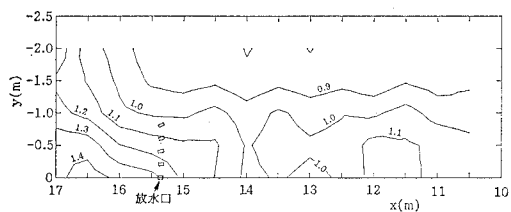
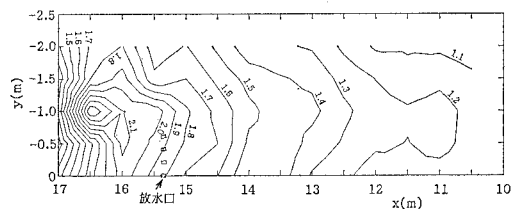
(a) $T=1.20$ s, $H_I=0.07$ m(b) $T=2.19$ s, $H_I=0.07$ m

図-4 流れ場における波高の平面分布

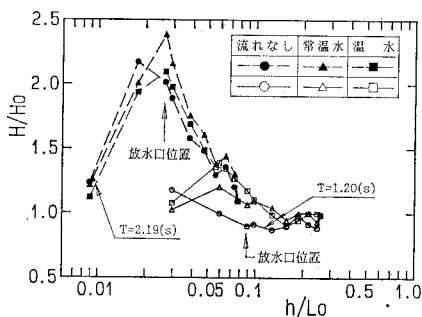


図-5 流れ場における浅水変形

場合に比べて、流れの影響により沖から波高増加が生じている。周期 $T=1.20$ s の場合、常温水では比較的沖から波高が増加するのに対して、温水では放水口の前面近傍で急激に波高が増加する。周期 $T=2.19$ s においても $T=1.20$ s 程ではないが流れの影響が現われている。

図-6 は構造物位置での進行波高 H_c に及ぼす放水流の影響を比較したもので、横軸は換算沖波高 H_0 である。図-6 (a) 周期 $T=1.20$ s, (b) 周期 $T=1.70$ s の結果では、非碎波の範囲の波高ならびに最大波高は放流がある場合の方が大きい。しかし、周期が長くなると流れの影響は小さくなり、図-6 (c) 周期 $T=2.19$ s にみられるように、最大波高は流れの有無によらずほぼ一定になった。

周期 $T=1.20$ s と 2.19 s の水深 0.20 m における波速は微小振幅波理論によれば、それぞれ 1.27 m/s, 1.36 m/s でその差は 7% 程度であるが、群速度は 1.05 m/s, 1.29 m/s でその差は 22% にも及ぶ。流れ場における周期の影響の強さは、群速度の大きさに依存する。流れの

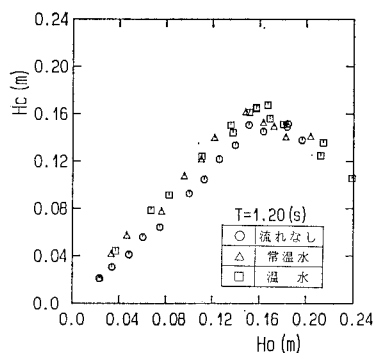
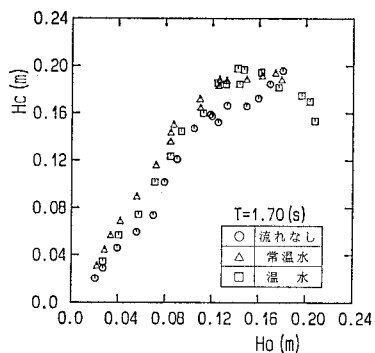
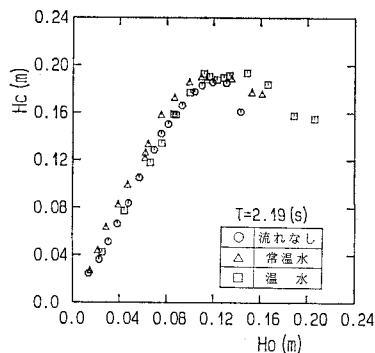
(a) $T=1.20$ s(b) $T=1.70$ s(c) $T=2.19$ s

図-6 進行波高の比較

波に及ぼす相対的な強さを流速波速比で表わすことが多いが、波のエネルギー伝播速度である群速度を用いて流速群速度比で表わす方が適切である。

放水流の流速分布を断面内で積分し算出した全体の流量は連行のために放流流量 $Q=0.00465$ m³/s の 5 倍以上になっていることが分かった。放水口の全幅 2 m を水路幅に設定し放流流量 Q で行った断面 2 次元水路実験では、連行がなく、また流れが断面内で一様化されるため、流れの影響による波高変化はほとんど認められなかった。

(2) 波力, 波圧特性

図-7 は構造物中心線上の波圧のピーク値の鉛直分布を, 流れなしの場合について示したものである. 波高が大きくなるにしたがって, p/wH_c は大きくなり, 波高と波圧との非線形な関係や鉛直分布形が著しく変化することが分かる. 図-7(b) $T=1.70$ s と (c) $T=2.19$ s ではほぼ同じ進行波高 H_c の範囲で波圧を測定しているが, $T=1.70$ s では p/wH_c は最大約 4 に対して, (c) $T=2.19$ s では約 10 となっている. このように波圧の大きさには周期の影響が強い. また, 最大波圧の作用点は $T=1.20$ s を除き静水位面上, 水深の約 1/2 高さとなっている.

衝撃砕波力を 3 分力計を用いて測定する場合, 測定系の固有振動による影響を受ける. 動的応答解析により測定結果を修正することも可能であるが, ここでは波圧分布から全波力を算出し, 3 分力計による測定結果と比較する. 測定は構造物を固定し, 5 回に分けて波圧分布を測定した. 波高計の信号を用いて同期し, 1 測線 9 ケ所, 前後, 5 測線の波圧波形を積分し全波力波形を求め, 最大波力を算出した. 図-8 はこうして求めた全波力の時系列である. (a) は参考のために行った非砕波の場合, (b) は砕波時のものである. 砕波時には, 波

圧積分結果にはみられないが, 3 分力計の測定波形には固有振動の影響が現われた.

図-9 に構造物位置での進行波高 H_c と全波力のピーク値 F_x との関係を示した. 図-9(b) 中の 2 つの◇印は図-8 の波力波形から全波力のピーク値を算出した結果である. 非砕波での波力, 衝撃砕波力とも 3 分力計の結果とほぼ一致した. 本実験での 3 分力計による測定では, 衝撃砕波力の腰掛け部などの波形は厳密でないものの, ピーク値は妥当な結果が得られたものと判断される.

波高 H_c と全波力 F_x との関係は, 波高が小さい範囲では F_x は H_c に比例して増加するが, 波高が大きくなると F_x は急激に増加する. (b) 周期 $T=2.19$ s

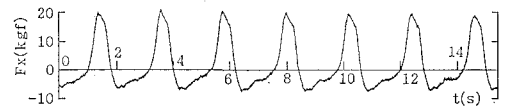
(a) $H_c=0.13$ m, $T=2.19$ s(b) $H_c=0.19$ m, $T=2.19$ s

図-8 波圧の積分による全波力の時系列

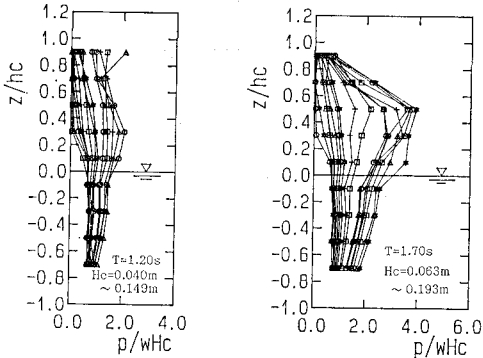
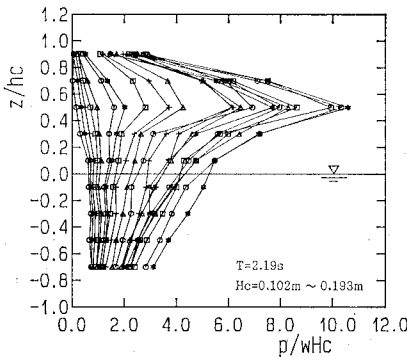
(a) $T=1.20$ s(b) $T=1.70$ s(c) $T=2.19$ s

図-7 波圧分布 (流れなし)

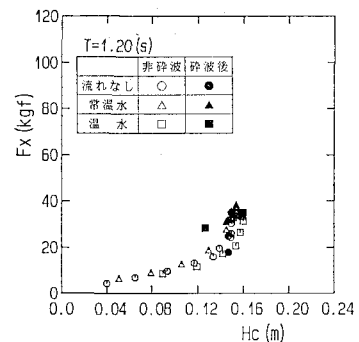
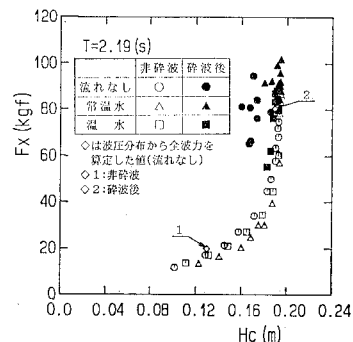
(a) $T=1.20$ s(b) $T=2.19$ s

図-9 波力の比較

ではこの現象が非常に顕著である。構造物位置における進行波高 H_0 で整理した結果、流れの有無、放流水の違い(常温水と温水)による波力の差は認められない。

合田ら(1966)は衝撃砕波力のモデル化において砕波巻込率の概念を導入した。これは砕波の直立面の高さと砕波波高との比で定義され、砕波の強さを表わすパラメータの1つである。榎木・後野(1982)は衝突波面の勾配が波力波形ピーク値を規定することを指摘し、また谷本ら(1986)は傾斜円柱が沖側に傾くにしたがって衝撃砕波力が大きくなることを示している。これらは、砕波時の波面と構造物とのなす角度が衝撃力を説明するのに重要な指標であることを示唆している。そこで、波形の前面の傾き(以下、前傾度とよぶ)について調べた。これは巻込率に比べ測定可能で、実態を表わす物理量と考えられる。図-10に進行波高 H_0 と空間波形の前傾度 $\eta_c/(T_0C)$ との関係を示す。ここに、図-10中に示すように η_c は波のクレスト高さ、 T_0 はゼロアップクロス点からクレストまでの時間、 C は波速の各測定値である。図に示されるように波高の増加にしたがって波形の前傾度は急激に増加する。これは図-9(b)に示した波高と波力との関係に非常に類似した変化を示している。

今回の放流流量の条件では、周期が一定の下では前傾

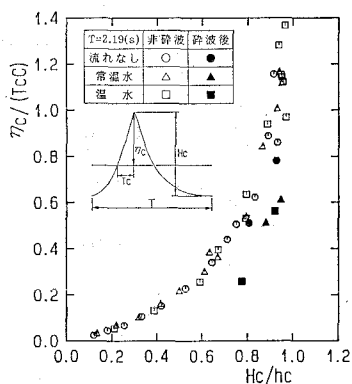


図-10 波高と波形の前傾度との関係($T=2.19$ s)

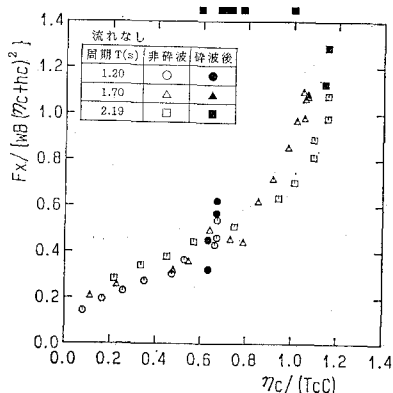


図-11 波形の前傾度と波力との関係(流れなし)

度は流れの有無、常温水、温水によらず進行波高 H_0 と前傾度との関係は一意的に定まった。しかし、流速波速比が大きくなると逆流のある場合の方が前傾度が小さくなる場合もある(榎山・田中, 1990)。

図-11は前傾度と無次元波力 $F_x/[wB(\eta_c+hc)^2]$ との関係を示す。ここに、 η_c+hc は波の峰が通過するときの全水位である。砕波後のデータには図の範囲を越えるものがあり、これらは図の枠外に示した。図より多少のばらつきはあるものの、図-9の進行波高と波力との関係に比べて、波形の前傾度 $\eta_c/(T_0C)$ と無次元波力は砕波にいたる範囲では明瞭な関係にあることがわかる。

以上より、斜面上の進行波の波高ならびに波形変化を評価することによって、非砕波時の波力から衝撃砕波力に至る波力の算定が可能であるものと考えられる。

4. 結 論

本研究では、海底勾配 1/15 という急勾配の条件下で、放水流による波の変形とそれに伴う波力、波圧を検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

1) 周期が短いと、非砕波の進行波高や最大波高は放流がある場合の方が大きくなる。周期が長くなると、最大波高は流れの有無によらずほぼ一定となる。

2) 流速波速比がほぼ一定の条件下でも、波に及ぼす流れの影響は周期によって異なる。これは相対水深の違いにより群速度が波速に比べ著しく変化するためである。

3) 衝撃砕波力を含め、進行波高と波力との関係には流れの影響は認められなかった。

4) 波圧においても流れの有無による顕著な差は認められなかった。無次元波圧強度 (p/wH_0) は最大約10の値を得た。その作用点は静水面上、水深の約 1/2 高さであった。

5) 非砕波から衝撃砕波力に至る波力が波形の前傾度と密接な関係にあるが明らかになった。

参 考 文 献

- 合田良美・原中祐人・北原正記(1966): 直柱に働く衝撃砕波力の研究, 港研報告, 第5巻, 第6号, pp. 1-39.
- 榎山 勉・田中寛好(1990): 流れによる波高・波形の変化, 第45回年講要集, II, pp. 740-741.
- 榎木 亨・後野正雄(1982): 円柱に作用する砕波局所波力に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 438-442.
- 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小藏紘一郎(1986): 円柱に働く衝撃砕波力に関する実験的研究, 港研報告, 第25巻, 第2号, pp. 29-87.
- 堀川清司・渡辺 晃・勝井秀博(1973): 円柱に作用する砕波力に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 37-42.
- 間瀬 肇・古田幸也・岩垣雄一(1987): 流れを考慮した屈折・回折方程式の誘導と数値計算例, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 81-85.