

クレセント型没水平板を利用した波エネルギー吸収システム

今井 貫爾*・秋山 義信**・工藤 君明***・續辰之介****

1. はじめに

没水平板は波の屈折現象を利用し波向きを変化させて波浪制御を行う新しい構造物である。没水平板とは、海面からある水深の位置に設置した水平板である。今井ら(1987)は、没水平板を用いた波向き制御のうち特に波を集める(集波)機能に着目し、集波に適した形状としてクレセント(三日月)形状を求め、これに対し波浪変形現象の把握を行った。その結果、クレセント型没水平板は良好な集波性能を有することが確認された。

本研究では、没水平板の有効利用(用途開発)の一例として、目標とする位置に没水平板により波を集め、そこに消波吸収装置を設置し、効率良く波エネルギーを吸収するシステムを考えた。ここで検討した消波吸収装置は、空気室型の波力発電装置と斜面型の揚水シュートの2種類である。はじめに、没水平板の無い状態で消波吸収装置単体でのエネルギー吸収効率の増加および吸収特性の把握を目的として実験を行う。次に、上記実験で良好な結果が得られたものに対し、没水平板と組合わせて実験を行い、平板の有無およびその設置状態により波エネルギー吸収効率がどのように変化するかを把握する。

2. 実験方法

2.1 実験模型

実験には、幅20m、長さ58m、深さ1.5mの平面水槽を使用した。没水平板と波力発電装置の組合せ方法を図-1に示す。また、図-2に没水平板と揚水シュートを一体構造として設置した場合の組合せ方法を示す。

a) 没水平板

没水平板の平面形状は、表-1に示す設計条件に対し、今井ら(1987)が示した屈折波理論を用いた方法により設計した。波力発電装置と組合せを行う没水平板は、周期1.2秒の波を平板入射側外縁から5.0m離れた地点に集波するようにし、代表長さ4.0m、代表幅1.25mである。

また、揚水シュートと組合せを行う没水平板は揚水シュートとの一体構造を考え、周期1.6秒の波を平板近傍2.0m地点に集波するようにし、代表長さ2.0m、代表幅0.6mである。

b) 波力発電装置

波力発電装置は、図-1に示すように固定式で40×40×70cmの空気室を3つ有し、それぞれの空気室天端部

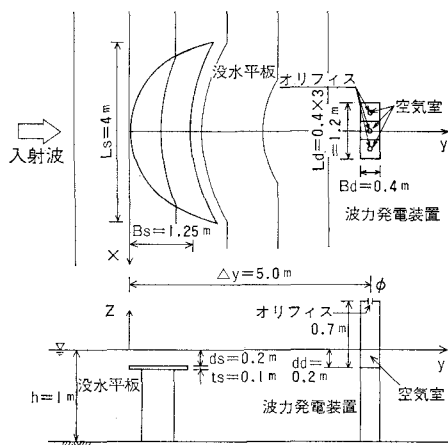


図-1 没水平板と波力発電装置

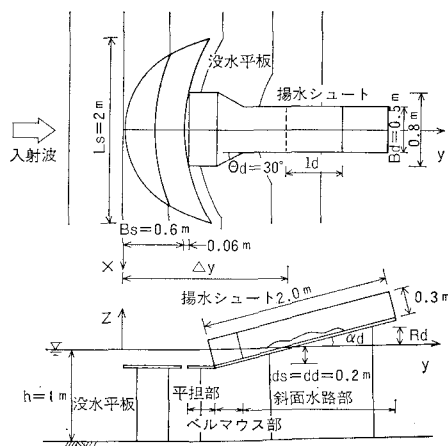


図-2 没水平板と揚水シュート

* 正会員 Ph.D. 鹿島建設技術研究所

** 正会員 工修 鹿島建設技術研究所

*** 工博 海洋科学技術センター

**** 水修 海洋科学技術センター

表—1 没水平板設計条件

	波力発電装置 組合せ用	揚水シュート 組合せ用
入射波周期 T_i (s)	1.2	1.6
水深 h (m)	1.0	1.0
没水深度 d_s (m)	0.2	0.3
焦点距離 f (m)	5.0	2.5
平板代表幅 B_s (m)	1.25	0.60
平板代表長 L_s (m)	4.00	2.00

表—2 実験条件

単体時条件				
	波力発電装置		揚水シュート	
装置 条件	オリフィス径 ϕ (mm)	35, 40, 45, 50, 55	水路幅 B_d (m)	0.3, 0.5
	傾斜角 α_d (°)		傾斜角 α_d (°)	15, 20, 25
	没水深度 dd (m)	0.2, 0.25, 0.3	没水深度 dd (m)	0.20
波 条件	水深 h (m)	1.0	水深 h (m)	1.0
	周期 T_i (s)	1.0, 1.2, 1.4	周期 T_i (s)	0.8~3.0
	波高 H_i (cm)	5.0	波高 H_i (cm)	5.0
組合せ時条件				
	波力発電装置		揚水シュート	
装置 条件	上記単体実験で良好な結果が 得られたもの。		上記単体実験で良好な結果が 得られたもの。	
波 条件	水深 h (m)	1.0	水深 h (m)	1.0
	周期 T_i (s)	1.0~3.0	周期 T_i (s)	0.8~3.0
	波高 H_i (cm)	3.0~10.0	波高 H_i (cm)	5.0
平板 条件	没水深度 d_s (m)	0.2	没水深度 d_s (m)	0.2
	代表幅 B_s (m)	1.25	代表幅 B_s (m)	0.6
設置 位置	集波目標点。 $dy=5.00m$		一体構造にするために近付 けた場合と集波目標点。 $dy=1.08, 2.50m$ (但し, 上記数値は $\alpha_d=25^\circ$ の場合)	

に波エネルギーの吸収のためのオリフィスを有する。設置位置は没水平板の集波目標点とし、方向は波入射方向に対し装置長手が直角になるように行った（ターミネータ型）。また、模型はオリフィスの径および空気室の没水深度を変化できる治具を取り付けた構造とした。

c) 揚水シュート

揚水シュートは図—2 に示すように、波の入射側から、平坦部・ベルマウス部・斜面水路部の3つから構成される。模型は斜面水路部の水路幅が 30, 50 cm の2種類とし、水路部の傾斜角を変化できる治具を取り付けた構造とした。設置位置は没水平板と一体構造もしくは集波予定点に設置した場合の2種類とした。

2.2 実験条件

表—2 に実験条件を示す。

a) 波力発電装置単体時実験条件

波力発電装置のオリフィス径・没水深度を変化させて、エネルギー吸収効率の良い条件の把握を行う。

吸収効率の良い波力発電装置は、空気室内の水面変動

が入射波に対して共振するものであると考えられる。そこで、簡単なモデルを用いて、平板の設計条件である周期 1.2 秒で共振する波力発電装置の没水深度条件を求める。波力発電装置の空気室内部の水塊を剛体と仮定すると、水塊の鉛直方向の運動方程式は以下になる。

$$(m+m_a)\ddot{z}+\rho g A z=0 \quad (1)$$

ここに、 A は空気室水際面積、 ρ は水の単位体積重量、 g は重力加速度、 z は鉛直方向変位である。また、 m および m_a はそれぞれ水塊質量および付加質量で、付加質量は水塊の下の半球面分の体積が排除する水の質量と仮定すると次式で示される。

$$m=\rho g a^2 d_a (A=a^2) \quad (2)$$

$$m_a=\rho g \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3$$

ここに、 a は正方形空気室断面の一辺の長さ、 d_a は没水深度である。以上より、固有周期を求めると次式になる。

$$T=2\pi\sqrt{(12d_a+\pi a)/12g} \quad (3)$$

以上より、式(3)に $T=1.2$ 秒を代入し計算を行うと d_a 0.25m が得られる。そこで、表—2 に示すように、没水深度は 0.25m を基準とし、0.20, 0.25, 0.30m の3種類を実験条件とする。

b) 揚水シュート単体時実験条件

揚水シュートの水路幅・水路傾斜角を変化させて、エネルギー吸収効率の良い条件の把握を行う。

水路傾斜角 α_d については一様斜面勾配で最大の邇上高さを与える斜面勾配 α_c を高田(1970)による次式を用いて計算を行い、変化させる基準値とする。

$$\sqrt{\frac{2\alpha_c}{\pi}} \frac{\sin^2 \alpha_c}{\pi} = \frac{H_0}{\lambda_0} \quad (5)$$

ここに H_0/λ_0 は入射波の波形勾配である。周期 1.4 秒、波高 5.0 cm で α_c を計算すると 19.4° になる。そこで、水路傾斜角は 20° を基準とし、15, 20, 25° の3種類を実験条件とする。

c) 組合せ時実験条件

消波吸収装置の条件は単体時の実験で良好な結果が得られたものを使用する。実験では、波高・周期の入射波条件を変化させて実験を行う。また、揚水シュート組合せ時は、平板と揚水シュートの水平距離（揚水シュートを平板に可能な範囲で近づけた場合と平板の集波目標点に設置した場合の2種類）を変化させる。

2.3 エネルギー吸収効率の測定方法

a) 波力発電装置の場合

波力発電装置のエネルギー吸収量 P の測定は、空気室内の空気圧 $p(t)$ および内部水面変動 $\zeta(t)$ を求め、以下に示す工藤ら(1984)の方法に用いて行う。

オリフィスを通過する空気流量 $Q(t)$ は空気室内の水

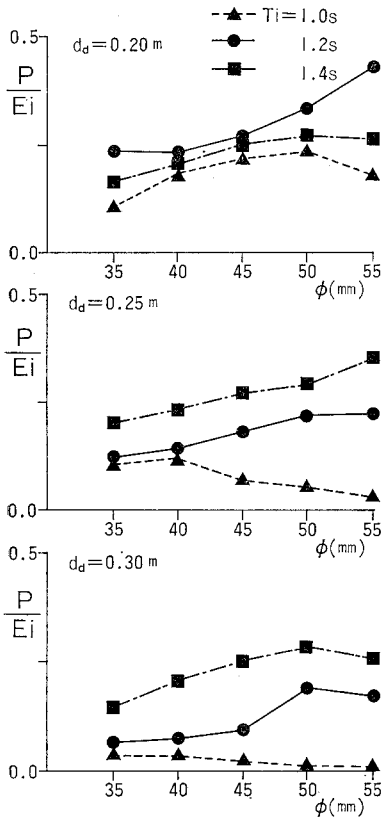


図-3 波力発電装置単体時の吸収特性

面変動 $\zeta(t)$ を用いて次式で示される。

$$Q(t) = A \cdot \zeta(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 A は空気室の断面積である。波力発電装置が行う仕事量は、上記流量が空気圧に抗して行う仕事であり、次式により示される。

$$W(t) = p(t) \cdot Q(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

よって、一周期平均パワー P は次式により与えられる。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$= \frac{A}{T} \int_0^T p(t) d\zeta$$

一方、入射波のエネルギーは次式のようになる。

$$E_i = (1/8) \cdot \rho g H^3 c_g \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 c_g は入射波の群速度である。以上より、エネルギー吸収効率 P を E_i で除すことにより求められる。

なお、内部水面変動・入射波の水面変動は容量式波高計を、空気圧は超小型半導体圧力計を用いて計測を行う。

b) 揚水シュートの場合

揚水シュートのエネルギー吸収量は、今回使用した模型では直接測定を行うのが難しかったために、揚水シュートの遡上高さにより表すことにした。

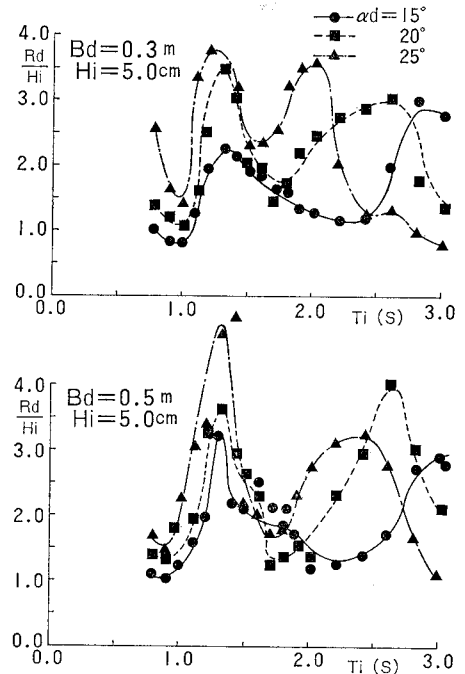


図-4 揚水シュート単体時の遡上高さ

遡上高さ R_d の測定は、揚水シュート水路部に設置した遡上計により遡上長さ l_d を測定し次式により計算するものとする。

$$R_d = l_d \cdot \sin \alpha_d \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 α_d は水路傾斜角である。

3. 実験結果および考察

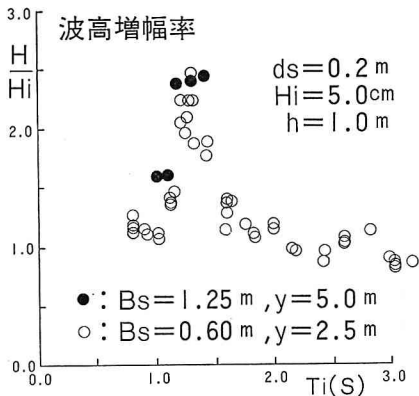
3.1 消波吸収装置単体時の吸収特性

a) 波力発電装置単体時の吸収特性

図-3 に実験結果を示す。横軸はオリフィス径、縦軸はエネルギー吸収効率である。図より実験を行った3種類の入射波周期に対比較的良好な結果が得られる条件は没水深度0.2m、オリフィス径50mmであると判断される。よって、組合せ実験では上記条件を持つ装置を使用する。

b) 揚水シュート単体時の吸収特性

図-4 に実験結果について示す。横軸は入射波周期、縦軸は入射波高で無次元化した遡上高さである。図より、水路幅が0.5mの方が0.3mの場合より遡上高さが大きい。また、入射波周期および水路傾斜角の変化にしたがい遡上高さの変動が激しい。最大の遡上高さは水路幅0.5m、水路傾斜角25°で入射波周期1.4秒の時で約5.0になる。よって、組合せ実験では上記条件の模型と、参考のために、水路幅0.5m、水路傾斜角15°の模型の2種類を使用する。



図—5 没水平板単体時の集波特性

3.2 没水平板単体時の集波特性

ここでは、組合せ実験に使用する没水平板単体時における集波特性の周期応答を図—5 に示す。なお、実験方法および測定方法については、今井ら(1987)による。横軸は入射波周期、縦軸はクレセント形状の焦点(集波目標点)における波高の増幅率である。図より、波高増幅率は、代表幅が1.25m, 0.6mの場合とも周期1.4秒付近で最大となり、その値は約2.5になることがわかる。

3.3 組合せ実験時の吸収特性

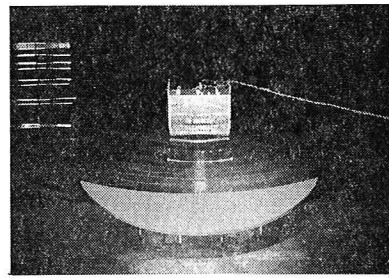
a) 実験状況

波力発電装置組合せ時の実験状況を写真—1 に示す。波は写真下方より入射している。周期1.0秒の場合には平板より集められた波が円弧状の波峰線を持つ波として波力発電装置に作用している。一方、周期1.2秒の場合には没水平板と波力発電装置間で反射の影響により激しい重複碎波が生じている。

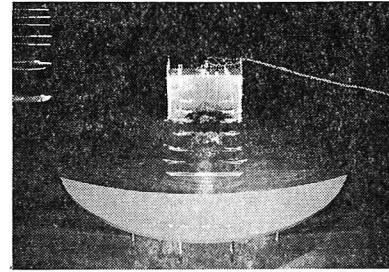
また、写真—2 に揚水シュートと没水平板を一体構造で設置した場合の実験状況を示す。波は写真上方より入射している。平板により集められた波が揚水シュートに作用する場合、目視観察の結果では、揚水シュートのベルマウス部で碎波を生じてしまい、水路部での顕著な翹上は見られなかった。

b) 波力発電装置組合せ時の吸収効率

図—6 に実験結果を示す。図には、波力発電装置単体時と没水平板組合せ時の2つの実験値について示す。横軸は入射波周期、縦軸はエネルギー吸収効率である。単体時と組合せ時では、組合せ時の方が大きな値を示し、周期1.4秒で生じるエネルギー吸収効率の最大値は組合せ時の方が約20%程度増大する。また、吸収効率の増加量は周期によって大差が無い。しかし、平板の集波性能が波高増幅率で約2.5倍であることを考えると、その増加の程度は小さいと考えられる。これは、没水平板で集められた波は、今井ら(1987)が示したように波峰分裂を生じ、しかも、水深方向の没水深度部分(上部)のみで、

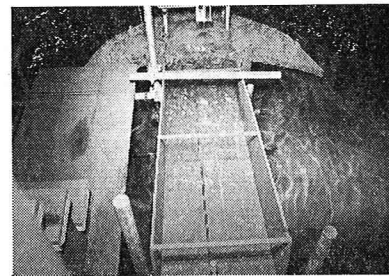


a) $T_i=1.0\text{ 秒}, H_i=5.0\text{ cm}$

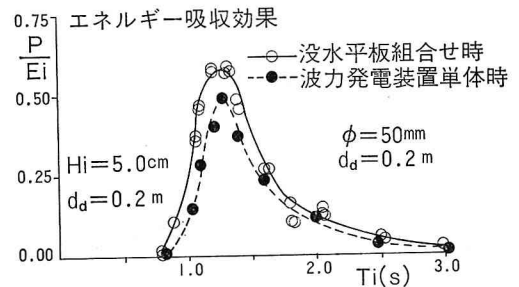


b) $T_i=1.2\text{ 秒}, H_i=5.0\text{ cm}$

写真—1 波力発電装置組合せ時実験状況



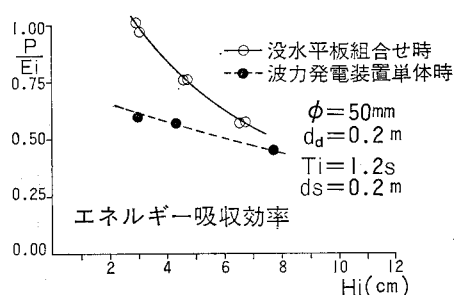
写真—2 揚水シュート組合せ時実験状況



図—6 波力発電装置組合せ時の吸収効率周期応答

エネルギーを増大させているためであると考えられる。以上より、平板と波力発電装置の没水深度が同じために、集められた波はほとんど反射してしまい、吸収効率の顕著な増幅が得られなかったものと考えられる。

図—7 に入射波周期を1.2秒に固定し、波高を変化させた時の実験結果を示す。横軸は入射波高、縦軸はエネ



図一七 波力発電装置組合せ時の吸収効率波高応答

ルギー吸収効率である。図より単体時と組合せ時の差は波高の小さい時に大きく、波高 3.0 cm の時には約 2 倍のエネルギー吸収効率になる。

c) 揚水シュート組合せ時の吸収効率

図一八に波高を 5.0 cm に固定し入射波周期を変化させた時の実験結果について示す。上図は傾斜角が 25° の場合、下図は傾斜角が 15° の場合である。横軸は入射波周期、縦軸は入射波波高で除した無次元週上高さである。

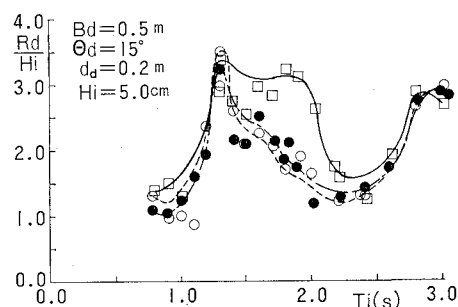
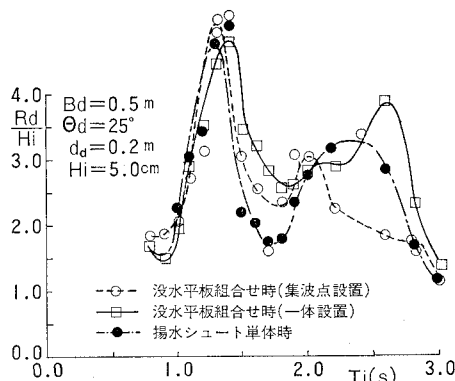
図より、組合せ時と単体時では、顕著な差が生じない。特に最大値が発生する周期 (1.3 秒付近) および最大値の大きさに関しても差は見られない。これは、揚水シュートが単体の時で能力が飽和状態に達しているためと考えられる。しかしながら、傾斜角 15° で一体設置の場合、高い週上高さを生じる周期範囲が長周期側に拡大する傾向が見られ、約 2.0 秒付近まで約 3.0 の週上高さを得ることができる。これは、没水平板・揚水シュート両者とも周期依存性が強いために、両者を組み合わせることにより相互干渉しこのようになったものと考えられる。

4. おわりに

没水平板を有効に利用する一例として、消波吸収装置と組合せて波エネルギーを吸収するシステムを考案し実験を行った。その結果以下に示す結論を得た。

a) 没水平板と波力発電装置を組合せた場合の、エネルギー吸収率は波力発電装置単体時に比し周期による違いは小さく、最大値で約 20% 程度増加する。また、入射波波高が小さい場合には単体の時に比し約 2 倍の吸収率が得られることが確認された。

b) 没水平板と揚水シュートを組合せた場合の、週上高さは、その最大値では大差が無いものの、高い週上高さを与える入射波周期範囲が拡大する傾向が確認された。



図一八 揚水シュート組合せ時の週上高さ周期応答

以上より、今回の実験の範囲では、没水平板を設置することにより、波力発電装置の場合は入射波波高が小さい時に、揚水シュートの場合には周期が長い時に有効であることが確認された。

今回考案した吸収システムは、没水平板と消波吸収装置を組合せることにより現象が複雑になり、必ずしも満足できる結果が得られなかった。今後、数値シミュレーションの開発も含め相互干渉効果について研究を行って行きたいと考えている。

最後に、本研究は海洋科学技術センターの「海域制御技術の研究開発 (青い珊瑚礁計画)」として実施したことを併記し、関係各位に感謝の意を表わします。

参考文献

- 今井貫爾・秋山義信・池谷 毅・工藤君明・續辰之介 (1987): クレセント型没水平板の集波効果に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 487~491.
- 工藤君明・堀田 平 (1984): 海明型波力発電装置の船型最適化に関する研究 (第 1 報), 海洋科学技術センター試験研究報告, JAMSTECR13, pp. 63~83.
- 高田 彰 (1970): 波の週上・越波および反射の関連性について, 土木学会論文集, 第 182 号, pp. 19~30.