

防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究

— 波力水車方式 —

近藤 俊郎* ・ 谷野 賢二**・ 高橋 幹夫***
渡部 富治****・ 奥田 教海*****

1. ま え が き

波力エネルギー吸収装置もしくは波力発電装置は昔から数多く考案されているが、組織立った研究の対象となったのは 1970 年以降である。近年における研究の対象は専ら「沖合・浮体式」と呼べる、主として沖合に浮いている物体の運動を利用してエネルギーを取り出す方式が中心となっている。なかでも海洋科学技術センターの波力発電船「海明」による実海域での大規模な実験は記憶に新しい。一方、従来、防波施設によって反射あるいは消散されていた波浪エネルギーを積極的に利用する方式も考えられる。

筆者らは沿岸の防波施設、特に防波堤の多目的利用のひとつとして波からエネルギーを取り出すことのできるタイプの防波施設を検討してきたが¹⁾、その 1 つとして防波堤に併設する波力水車式のエネルギー吸収装置を考案し、研究している。本論文では、吸収装置の特性を明らかにし、あわせて防波施設としての機能を検討するものである。

2. 基本的な特徴

ここで対象とする波力水車式のエネルギー吸収装置は、図-1 に示すような通常の防波堤用ケーソンの前壁を取り払った構造物の内部の水室内に定常波を発生させ、その節の位置における水の水平運動によって水車を回転させてエネルギーを取り出そうとするものである。定常波動の水粒子速度は交番性なので、水車から一定方

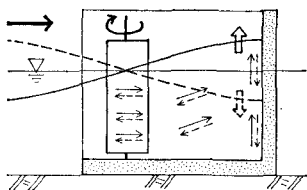


図-1 水室内の定常波動

向の回転力を得るには、プロペラ型水車の回転軸に一方方向クラッチを介する方法と、羽根の抗力の不均衡を利用して何れの方向の流れに対しても一方向に回転するサボニウス・ロータを用いる方法が考えられる。ここでは維持補修上の容易さから、鉛直軸型のサボニウス・ロータを研究対象として取り上げた。この型式では回転運動の際に抵抗となる羽根が常に存在するので、この欠点を改善する目的で流れを片寄せする導流板を設けた。

3. エネルギー吸収装置

(1) 水車の回転運動の解

波力水車を有する防波構造物による波の変形と吸収エネルギー工率などの解析は小振幅長波を対象に行なったが、その手順の概要は次の通りである。

(i) 有限幅員の透水層を有する段上り型の不透過堤による波の線形理論を誘導する。(ii) 水車並びに段上り等による損失係数を推定し、非線形抵抗を線形化して (i) の理論を用い、繰返し計算により水粒子速度、反射率等を計算する。(iii) 水車の運動方程式をたて、その解から (ii) の水粒子速度を用い吸収工率等を計算する。このうち、(i)、(ii) については発表済み^{2),3)}であるので、(iii) について述べることにする。

鉛直軸をもつ波力水車の運動方程式は、

$$(I + I_a)\ddot{\theta} + N_w\dot{\theta} + k\theta = \tau_w - \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 I : 水車の慣性モーメント、 I_a : 水車の水中での付加慣性モーメント、 N_w : 水車の造波抵抗係数、 k : 水車の水中での復元係数、 τ_w : 水車に作用するトルク、 τ : 負荷トルク、 θ : 水車の回転角。

図-2 に示すような波力水車に作用するトルクは下式で推定される。

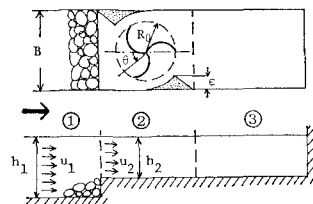


図-2 不透過堤モデル

* 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 室蘭工業大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 日本テトラポット(株) (前室蘭工業大学大学院土木工学専攻)

**** 工博 室蘭工業大学教授 工学部2部機械工学科

***** 室蘭工業大学教授 工学部機械工学科

$$\tau_w = \rho C_t u_2^2 R_0^2 h_2 / 2 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 C_t はトルク係数である。 $u_2 = U \cos(\sigma t - \delta)$ とおくと、(2) 式の平均値は

$$\bar{\tau}_w = \rho R_0^2 h_2 U^2 C_t / 4 \quad \cdots \cdots (3)$$

負荷トルク τ は角速度 $\dot{\theta}$ に比例するとして次のようにおく。

$$\tau = N_t \dot{\theta} + \tau_{t0} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 N_t 、 τ_{t0} は負荷の抵抗係数である。この水車では k は小さいと考えられるのでそれを無視すると、(1) 式は下式のようになる。

$$\ddot{\theta} + p\dot{\theta} = r \cos 2(\sigma t - \delta) + q \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに、 $p = (N_w + N_t)/(I + I_a)$ 、 $q = (\bar{\tau}_w - \tau_{t0})/(I + I_a)$ 、 $r = \bar{\tau}_w/(I + I_a)$ 。この解は下式で与えられる。

$$\theta = \frac{r}{2\sigma\sqrt{4\sigma^2 + p^2}} \sin\{2(\sigma t - \delta) + \gamma\} + \frac{q}{p}t + Ce^{-pt} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここに、 $\gamma = \tan^{-1}(2\sigma/p)$ である。

エネルギー吸収工率 W_g は次式で与えられる。

$$W_g = \tau \dot{\theta} \quad \cdots \cdots (7)$$

入射波の平均工率 $\bar{W}_i$ は次式で与えられる。

$$\bar{W}_i = B \bar{E}_t C_{g,i} = w_0 H_t^2 BC_{g,i} / 8 \quad \cdots \cdots (8)$$

ここに、 $\bar{E}_t$ 、 $C_{g,i}$ はそれぞれ入射波の単位表面積あたりの平均エネルギーと群速度である。 W_g の一周期間あたりの平均値を $\bar{W}_g$ として、 $\bar{W}_i$ に対する比をエネルギー取得率 η_g (%) と定義すると、

$$\eta_g = 100 \bar{W}_g / \bar{W}_i \quad (\%) \quad \cdots \cdots (9)$$

水車の効率 η_e は、水車並びに導流板が無くてしかも背後の不透過壁が無い構造での③領域への伝達波の工率 $\bar{W}_t'$ に対する $\bar{W}_g$ の割合であるから、

$$\eta_e = 100 \bar{W}_g / \bar{W}_t' \quad \cdots \cdots (10)$$

となる。

(2) 実験

a) 実験装置および方法

実験は長さ 24 m、幅 0.6 m、高さ 1.0 m の両面ガラス張りの二次元造波水路を用いた。水路内には 1/20 勾配の斜面が設けられている。図-3 は水車出力の測定に

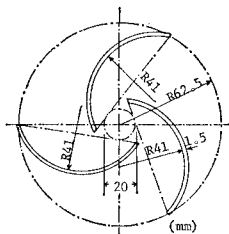


図-3 サボニウス・ロータ

用いたサボニウス・ロータ (高さ 39 cm) の断面図である。水車を収納する防波構造物模型は高さ 60 cm、幅 60 cm、奥行 50 cm の箱型の前面を取り払った形のアクリ

ル製で、水室は 3 室に仕切っている。中央の水室にある水車には、抵抗線式トルク変換器とフォト・トランジスターを用いた回転計が取り付けられている。

造波水路における波動実験に先だって実施した定常流実験の結果を参照して、導流板の諸元は $\epsilon/B = 0.33$ 、 $R_0/B = 0.7$ とした。

構造物前面水深は 38、45 cm、入射波の波高は 5、8、12 cm とし、周期は 1.0~2.2 sec である。各波高と周期の組合せ毎に、水車が無拘束回転から停止するまで負荷を種々に変化させて、その効率曲線から最高水車出力を求めた。

b) 実験結果

図-4 は各ケースの変換効率 η_e の最大値と相対奥行

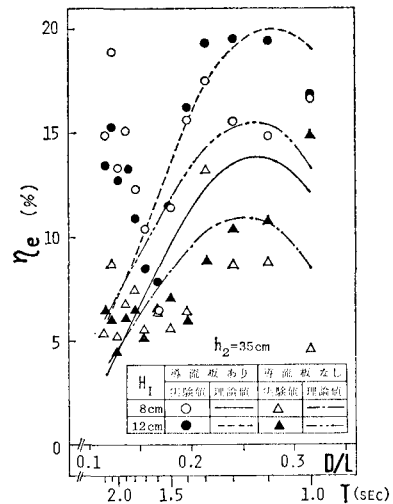


図-4 D/L (T)~変換効率

長 D/L の関係を示したものである。ここに、 D : 水車中心から後壁までの距離、 L : 水室内波長である。同図から、導流板の効果は明らかであり、導流板有りのほうが最大で 2.8 倍ほど効率は向上する。導流板を付設すると D/L によって双頭型のピークが出現し、効率の最大は約 19% である。 $D/L \approx 0.25$ にあるピークは部分重複波の節にあたることで水車の回転数の向上として理解できるが、0.13 付近のピークについては、原因は明確でない。

4. 消波性能

(1) 実験方法

実験模型は海上実験用テスト・プラントの計画規模の 1/20 モデルを想定し、図-5 に示されるような、捨石マウンドとアクリル製堤体から成っている。実験は堤体のみの場合、水車、導流板を併設した場合、堤体開口部を板で塞いで直立壁とした場合についてそれぞれ行なった。水車併設の場合は、水車を固定した状態と無拘束回

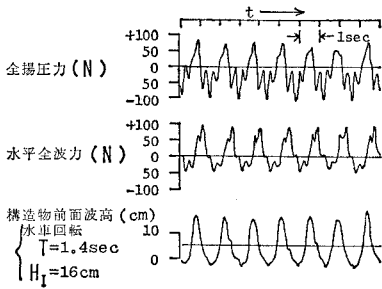


図-9 波力、揚圧力測定記録例

よりも波力は減少している。また、 $P_{v,max}/P_{v,g}$ は周期が長くなるほど減少する傾向にあり、1.2~0.6 の値となっている。

図-9 は水平全波力と全揚圧力の時間記録の例であり、同時に構造物前面波高も記録されている。同図から知れるように、全揚圧力のピークは前面波高のピークと一致している。一方、水平全波力は後壁に波の峯があるときに出現している。波力の絶対値の低減に加えて、この様なピーク位相のずれが直立壁に比べて滑動限界波高を大きくし、安定性を高めている要因となっている。

c) 水車に作用する波力の特性

図-10 は波高と周期に対する全波力 P_T の変化を示したものである。波高との関係をみると、水車固定、回転ともに正の（流れにおける）波力 P_{T+} の増加率は負の（流れの）それよりも大きい。一方、周期に対する波力の変化をみると、短周期に向って漸減する傾向にある。このとき、水車回転では正の波力の方が大きい。水車固定ではその関係が逆転している。これは水車固定の場合、後壁と水車間での定常波が卓越していることによると推定される。なお、 P を正の流れに対する波力、 H_I を入射波波高、 A を受波面積とし、波力係数 C_p を $P = w_0 C_p H_I A$ で定義すると、 A として水車の投影面積をとった場合、およそ $C_p = 0.6$ である。

6. テスト・プラントの建設と現地観測

(1) テスト・プラントの計画と設計

この種の波浪エネルギー吸収装置は実際には不規則な海の波で稼動するものであるから、それに対する装置の特性や耐久性を調べておくことが不可欠となる。そこで波浪規模の小さい噴火湾に面した室蘭港北外防波堤に、小規模なテスト・プラントを設置することにした。室蘭港における波浪条件を検討した結果、テスト・プラントの規模は図-11 のようにした。

図-12 にテスト・プラントに取り付けた変換装置の系統図を示す。変換装置には、往復流中の水車の回転変動を平滑化する為にフライホイールが、また、フライホイール側が水車側に動力の逆流を生ずるのを防ぐ為に一方クラッチがそれぞれ取り付けられている。

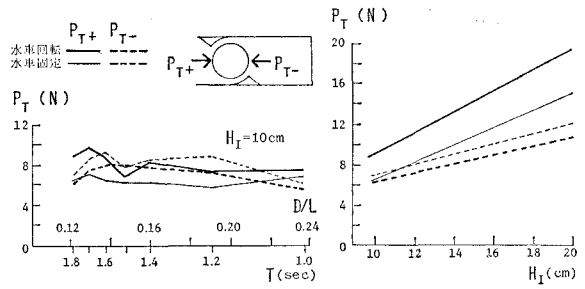


図-10 水車に作用する波力

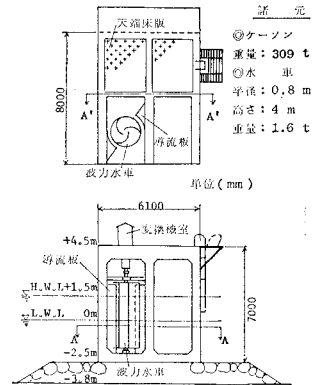


図-11 テスト・プラント概要

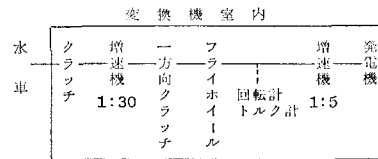


図-12 変換機系統図

本装置による目標最大出力 W_{gt} は、取得率 10% とすると、以下ようになる。

$$H_{I/3} = 1.0 \text{ m}, \quad T_{1/3} = 5 \text{ sec} \text{ の場合, } W_{gt} = 0.62 \text{ kW}$$

$$H_{I/3} = 1.5 \text{ m}, \quad T_{1/3} = 6 \text{ sec} \text{ " , } W_{gt} = 1.7 \text{ kW}$$

これより、2 kW の直流分巻発電機と負荷抵抗機を準備した。

(2) テスト・プラントにおける観測

図-13、表-1 は 56 年 5 月に行なわれたテスト・プラントによる観測結果の例である。解析は 10 分間のアナログ・データを 0.5 sec 間隔でサンプリングし、A/D 変換して回転軸出力と発電機出力の最大値、平均値、頻度分布を求めた。波の周期と波高は、テスト・プラント

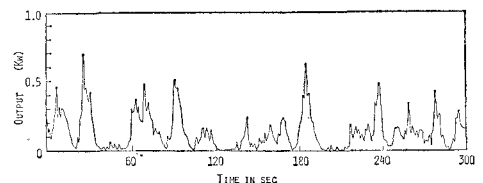


図-13 発電出力

表-1 出力の解析例

波 浪 条 件			エ ネ ル ギ ー 吸 収 特 性				
観測時刻	$H_{1/3}$ 有義波		観 測 時 刻	最大出力 kW		平均出力 kW	
	波高 m	周期 sec		回 転 軸	発 電 機	回 転 軸	発 電 機
			1530~1540	1.898	1.227	0.229	0.146
	15	1.0	4.1	1540~1550	1.436	1.035	0.210
16	1.1	4.2	1550~1600	1.766	1.081	0.196	0.125

から 2 km 沖、水深 -23 m の地点に設置された北海道開発局の超音波式波高計のデータからテスト・プラント位置の波高を推定した。

図および表から知れるように、平均出力は最大出力のおよそ 1/10 であり、差が相当大きい。単位峯幅あたりの入射波の工率を、 $H_0',_{1/3} = K_r H_{0,1/3}$ とし、次式⁵⁾

$$\bar{W}_t = 0.44 H_0',_{1/3}{}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW/m}) \quad \cdots \cdots (11)$$

で計算した場合、平均出力でのエネルギー取得率は 4% 程度に留まった。今後、装置の特性を更に検討し、平均出力と最大出力の差を縮める努力が必要である。

7. あとがき

室内実験およびテスト・プラントによる観測を通じて

本システムの波浪エネルギー吸収装置として可能性を追求してきたが、波浪条件に応じた最適負荷の設定方法等多くの課題が残されている。今後、さらに研究を進展させ、実用化に向けての基礎資料を充実する所存である。

なお、本研究の一部は昭和 53・54 年度文部省科学研究費試験研究 (2) によって行なったものである。

最後に、本研究を進めるにあたり、室蘭工業大学松田敏彦教授並びに同鈴木好夫、山下光久助手からは計測およびデータ解析について始終ご指導を賜わった。また、北海道開発局室蘭港湾建設事務所の各位には波浪資料等につきご支援いただいた。ここに記して深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 近藤俊郎：防波施設と併用する固定式波力発電装置の研究，昭和 53，54 年度文部省科学研究費試験研究 (2) 研究成果報告書，44 p.，1980.
- 2) 近藤俊郎：段上型直立消波構造物の機能について，第 27 回海講論文集，pp. 339~343，1980.
- 3) 近藤俊郎 他：波力水車のエネルギー吸収特性，土木学会北海道支部論文報告集，第 37 号，pp. 175~180，1981.
- 4) 谷本勝利 他：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技研資料，No. 249，38 p.，1976.
- 5) 吉本 豊 他：北海道各港の波浪特性，土木学会北海道支部論文報告集，第 37 号，pp. 169~174，1981.