

防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (5)

——システムの最適化——

近藤 俣郎*・渡部 富治**・谷野 賢二***

1. ま え が き

前報まで防波堤、海岸堤防などの防波施設に併設される沿岸固定型の波浪エネルギー吸収システムについて、吸収装置として波力水車式や振り子式装置を用いた場合を対象に解析、室内実験ならびに現地試験を行って研究を進めてきた^{1)~4)}。その結果として、1) 振り子式が高効率であること、2) 斜め入射波に対する3次元解析法、3) 取得エネルギーの推定法などを明らかにした。

本論文では振り子式装置をもつ固定型システムについて、取得エネルギー単価を低くするための手法を考察し、設置水深による最適化を提案する。また振り子や堤体全体に作用する波力を実験で調べ、振り子の設計上の諸課題を検討する。その結果をもとに小離島である焼尻島のケーススタディについての計画案を示す。

2. 取得エネルギー単価の低減化

波浪に限らず自然エネルギーの利用の場合、取得エネルギー単価を支配する要因はおおよそ次のようなものから成る。1) 入力エネルギー量、2) 変換システムの効率、3) システムの建設費、4) 運転費。1) と 2) は大きいほど、3) と 4) は安いほど取得エネルギー単価を低くできる。そしてそれから決まるエネルギー単価 (円/kWh) が現在の取得単価を下回るものでなければ実現性がうすい。近年の石油価格の低下と円高の傾向が、我が国の発電単価を安くさせ、それに伴って自然エネルギーの開発利用が極めて困難となっている。このような状況下で波浪エネルギーの取得利用の可能性を開くための単価低減案としては、次のことが考えられる。i) 離島などのように既往のエネルギー取得単価が高い地域、ii) 入力エネルギー量の大きい地点、iii) 高効率の吸収システムの採用、iv) 他の目的の堤体内に併設する、などである。

このうち i) と ii) は与えられた社会的、自然的な条件であり、iii) と iv) が技術的な課題である。波浪エネルギーが他の自然エネルギーと比較して特徴的なことは、

風力ほどではないとしても、非定常性が強いことである。それに対応して実用エネルギーを得るには、波浪エネルギーを機械的エネルギー効率良く変換するための一次変換装置の開発が必要であった。このことについては1973年の第1次石油バニック以後、急速に開発が進められ、多くの国で精力的に研究された。今日まで広く研究の対象とされているのは、空気タービン式である。しかし一次変換効率に着目すれば振り子式の平均効率は40%以上で、空気タービン式の2倍以上の極めて高効率である⁵⁾。振り子式の取得エネルギー量の推定については、振り子の運動に伴う損失を無視した線形理論は、現地試験値と比して約20%大きくなるが、その範囲では十分推定可能であることが示されている (図-1)^{6), 7)}。iv) については本研究は一貫して防波施設に組み込めるシステムを対象に、他の施設との多目的利用に適する吸収装置を扱っている。すなわち水車式や振り子式は直立消波構造物の一型式に相当すると考えている。上出の方法のほかに、水深による入射波パワーと設計波力の変化の違いを利用して、単価からみた最適設置水深を求める

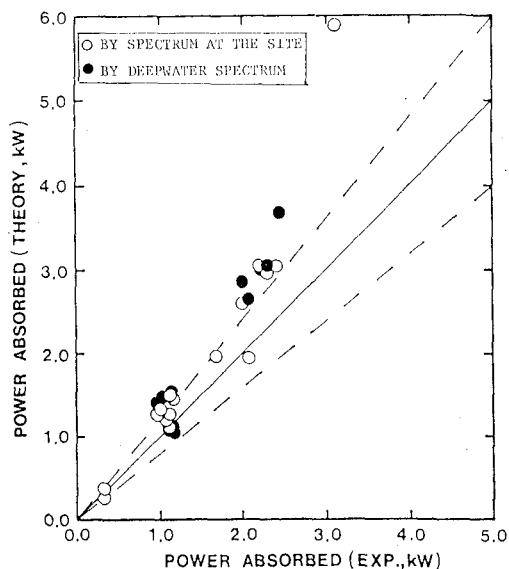


図-1 振り子式の吸収エネルギーの実験値と理論値の比較

* 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科

** 工博 室蘭工業大学教授 工学部第二機械工学科

*** 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室副室長

方法があると考える。

3. システムに作用する波力

振り子式のような可動物体による波浪エネルギー吸収装置をもつシステムの設計に際しては、堤体全体の設計波力と各部材に作用する設計荷重を推定する必要がある、しかも負荷の状態によっても波力が変化する。振り子式について、振り子を固定した状態、エネルギー吸収時ならびに無負荷の3条件下について、実験プラントに設置した振り子²⁾の1/5の模型で実験した。

(1) 実験装置: 実験は幅0.6、長さ24、高さ1(m)の両面ガラス張り造波水路で行なわれた。図-2に振り子式を組込んだ堤体をモデル化した実験用模型の断面を示してある。振り子、後壁および底板は検力計を介して水路上端の架台より吊り下げられた状態で設置されている。実験条件は、水深 $h=0.6$ m、水室内水深 $h'=0.47$ m で入射波は規則波ですべて非碎波で、 $H_t=5\sim 10$ cm である。振り子の条件は、振り子固定の状態、可変絞り弁を実験周期内でエネルギー吸収効率が最も高かったときの弁開度に設定した状態ならびに絞り弁を開放しほぼ無負荷の状態の3種類である。

(2) 実験方法: 振り子と後壁に作用する波力は図-2に示すA、B点に作用する曲げモーメントから次式で求められる。

$$F = \{M_1(t) - M_2(t)\} / dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、振り子については(1)式中に振り子の運動によって生ずる荷重が含まれている。この荷重 $F'(t)$ とすると、それは次式で与えられる。

$$F'(z) = \frac{1}{dz} \left[\frac{d^2\theta}{dt^2} \left\{ \int_{z_1}^{z_2} m(z)(z^2 - zz_1) dz + dz \int_{z_2}^{l_a} m(z)z dz \right\} + \theta(t) \left\{ \int_{z_1}^{z_2} gm(z)(z - z_1) dz + dz \int_{z_2}^{l_a} gm(z) dz \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 z : ヒンジ点から振り子の任意点までの鉛直距離、 l_a : ヒンジ点から振り子下端までの距離、 $\theta(t)$: 振り

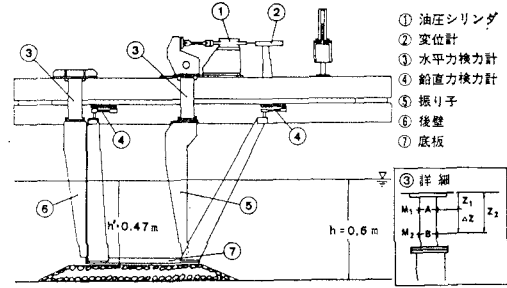


図-2 波力測定用模型断面

子の動揺角、 g : 重力加速度、 $m(z)$: 鉛直方向任意点における振り子ストリップの質量とする。したがって、振り子に作用する波力は、 $\{F(t) - F'(t)\}$ として得られる。底板に作用する鉛直力は図-2中の④で示してある4個のロードセルに働く力の合力として計測される。振り子の変位は振り子のヒンジ点から0.15 mの高さに設置した変位計によって求めた。波形は受波板の前方に0.29 m間隔あけて設置した2本の容量式波高計により測定した。計測器からの出力はサンプリング周期25~50 msでA/D変換し、カセット磁気テープに記録した。

(3) 結果と考察: 入射波高は入・反射波分離法で推定した。振り子および後壁に作用する水平波力と底板に作用する鉛直波力については、それぞれの記録からゼロアップクロス法で一波ごとの最大波力と最小波力を求め、それぞれの平均値を計算した。また振り子の動揺角を変位から求めた。図-3, 4, 5はそれぞれ振り子、後壁、底板に作用する波力を無次元化し、相対水深を横軸にとり、負荷の状態をパラメーターとして表わしたものである。振り子に作用する波力は図-3に示すように、予想されたように固定、負荷時、無負荷の順になっていて、相対水深 h/L の影響はあまりないことが知れる。固定の場合でも無次元波圧強度は最大で0.8であり、大きくはない。図-4に示す後壁に作用する波力は、振り子の場合とは逆に無負荷時が大きくなり、しかも h/L によって振動する。この理由は $h/L \approx 0.2$ 付近の極大値は振り子の位置に節があるような定常波動で、0.4 付近の極大値は振り子が壁となるような定常波動によって出

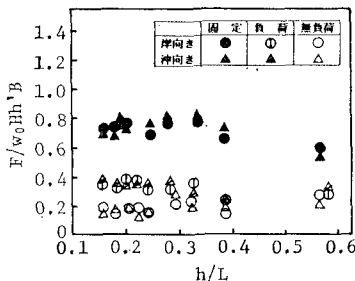


図-3 振り子に作用する波力

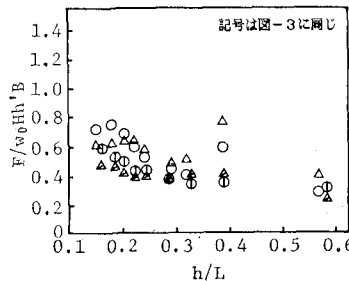


図-4 後壁に作用する波力

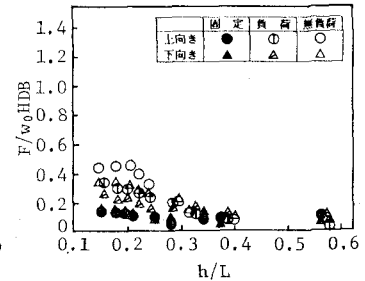


図-5 底板に作用する波力

現している。この場合も無次元波圧強度は0.8以下であるが、 $h/L > 0.2$ では冲向きの波力が大きくなっている。底板に作用する波力は上向き(揚圧力)と下向きがある。図-5のように固定時の波力が負荷時や無負荷に比べて格段と小さく、最も大きいのは無負荷時の上向きである。

以上は各部に作用する波力の特性であるが、ケーソンの安定について検討も必要がある。そこで滑動合成波力を求め、直立堤とみなした場合の合田式による計算波力と比較した。実験値は振り子、後壁および底板に作用する波力の合成値として、下で求めている。

$$F_H(t) + F_H'(t) \pm \mu F_V(t)$$

ここで、 $F_H(t)$ 、 $F_H'(t)$ 、 $F_V(t)$ はそれぞれ振り子、後壁で、底板に作用する波力である。(±)の符号は F_H' と F_H が正のとき(+)を、負のとき(-)を採る。上式で得られた合成波力の最大、最小値を求め、それぞれの平均値と岸向き、冲向きの波力とした。図-6はそのうち固定と無負荷時の実験値を計算値との比で表わしたものである。振り子固定ではその比は0.6~1.2、無負荷時は0.5~1.4である。なお、負荷時の比は0.6~1.1で最も小さい。波力の方向別では、振り子固定の場合は岸向き波力が卓越しているが、無負荷時、負荷時では冲向き波力が大きくなる。このことは、冲向き波力が作用するときは水室内の水量が減少し、底板に作用する揚圧力が大となるからである。このため無負荷時は、岸向きよりも冲向きの合成波力が大となって、堤体が冲向きに滑動するケースが多くなる。大波浪が作用するような時には、無負荷状態は危険であるから、振り子を固定するような対策が必要となる。

なお、室蘭港に設置された実験プラントのケーソン(図-7)は、1980年3月に建設されて今日まで安定を保っている。

4. 振り子の設計上の問題

上出のように振り子に作用する平均的な波力特性は知れた。しかし可動物体型は当然ながら複雑な現地波浪による波力を直接受けるため、局所的な波力の推定は困難である。著者らは可動物型の吸収システムの設計に資する目的もあって、実験プラントでの振り子や水車などの設計波力を低くおさえ、安全性の経過を調べる方針を採用した。その結果得られた振り子式システムの損害の特徴は表-1のように要約される。

室蘭港の実験プラントの振り子

$$\frac{(F_H' + F_H' \pm \mu F_V) E}{(F_H + \mu F_V) G}$$

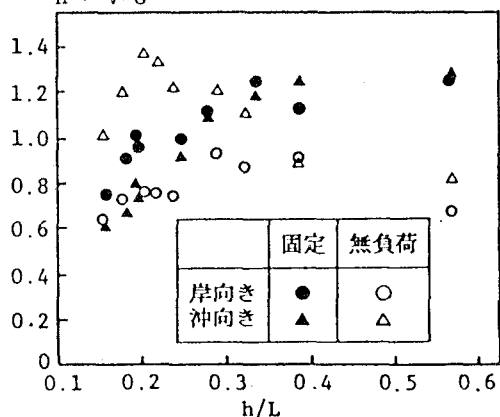


図-6 滑動合成波力

式は1983年3月に設置されたが、その2.5月後から表-1に示したようなトラブルが発生した。それらの問題がある程度解決されて今日に至っているが、課題となるのは疲労損傷である。

可動物体のある局所の応力を下式のようにおくとする。

$$S = f(H) \cdot q(H) \dots\dots\dots (3)$$

ここで $f(H)$ は外力による静的応力であり、 $q(H)$ は正弦波動的振動外力による増幅率とする⁹⁾。 $f(H)$ は a を係数として

$$f(H) = aH \dots\dots\dots (4)$$

表-1 振り子式の損害の特徴

種別	事項	対策
設計上	厚い部材と薄い部材との接合部が破損しやすい。	接合部は急変を避け漸変断面とする。
施工上	部材接合溶接の際の局部的弱点発生。ネジのゆるみの発生。	構造的な検査を行なう。
機構的	振り子の過動揺を抑えるためのストッパーに当たる際の衝撃。	防衝材をもつストッパーの使用。

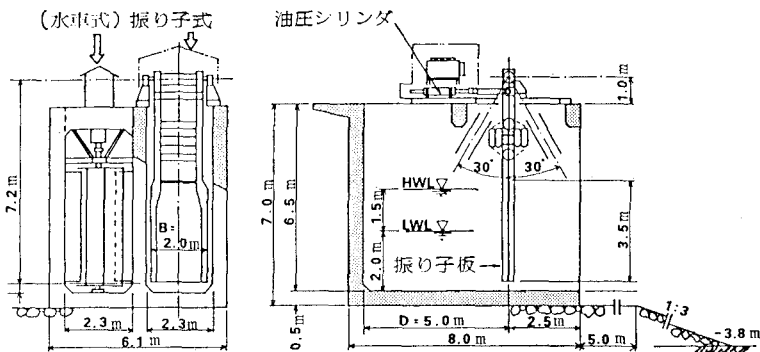


図-7 室蘭工大波浪エネルギー実験プラント

とおくことができる。動的増幅率は振り子の運動方程式が下のように与えられる¹⁰⁾。

$$(I+I_1+I_2)\ddot{\theta}+(N+N_1+N_2)\dot{\theta}+K\theta = Ma \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (5)$$

かつ σ と H の間に下式の関係があるとするなら

$$\sigma (=2\pi/T)=D_1 e^{-C_2 H} \quad \dots\dots\dots (6)$$

下のようになる。ここで C_1, C_2 は係数。

$$q(H)=1/\sqrt{\left(1-\frac{C_1^2 e^{-2C_2 H}}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{4\xi^2 C_1^2 e^{-2C_2 H}}{\omega_0^2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi = \frac{N'}{2I'\omega_0} = \frac{N'}{2\sqrt{KI'}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{K/I}, \quad N' = N+N_1+N_2 \\ I &= I+I_1+I_2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上において θ : 振り子の振り角, I : 振り子の慣性モーメント, K : 復原モーメント係数, Ma : 波浪強制モーメントの振幅, σ : 角周波数。また I_i, N_i は次式で定義される radiation 流体力の係数である。

$$M_i = -I_i \ddot{\theta} - N_i \dot{\theta}, \quad i=1, 2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで添字 1, 2 は振り子の海側と水室の流体に対応する。

実験プラントの振り子について Miner の法則をもととして確率波高分布による決定論的疲労解析¹¹⁾を適用した。ホットスポットとしては振り子板とシリンダーの接合部とし、上出の静的波力と動的増幅率を考慮した場合とについて計算したところ、疲労寿命は前者によると 4.2 年、後者では 0.3 年となった。このことと、実物の経過から判断して、動的増幅率を考慮した疲労設計の必要性が認められる。

5. 焼尻島のケーススタディ

2 節で述べたように今日の我が国で波浪エネルギー利用の実用化に最も適している小離島の一つとして、北海道の焼尻島を取上げたケーススタディ¹²⁾を著者らは進めている。焼尻島は面積 5.3 km²、人口 630 人で西隣りにあるほぼ同じ規模の天売島と共に本処が対岸の羽幌町に属する小離島である (図-8)。現在は北海道電力 (株) がジーゼル発電で両島の電力を供給している。基幹産業である漁業は沿海の資源が減少していることから衰退している。このため島の人口は最近 20 年間に約 1/3 に激減した¹³⁾。この状況を脱脚するため栽培漁業への転換が急がれているが、冬季の海水温保持のための熱源が必要である。冬季に波浪エネルギー量が格段と大きい日本海だけに、取得エネルギーの利用に好都合である。

対象地点を図-9 に示した中島の埼として、そこにエネルギー吸収システムを備えた離岸堤を設け、その背後

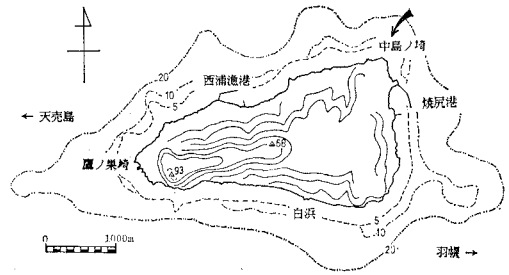


図-8 焼尻島周辺深浅図

の水域の一部を栽培漁場として利用するものとする。その際に離岸堤の水深を、最も取得エネルギー単価を低くするように定めるものとする。取得されたエネルギーは熱源のほか漁場の海水交流のための動力や電力として利用される。

島での波浪観測データが無いので、単位峰幅当りの波浪の入力エネルギー $\bar{W}$ (kWh/m) を留萌港のデータと島での風記録から推定することとした。推定水深は 10, 7.5, 5, 3, 2, 1.5, 1 (m) とし、屈折ならびに碎波変形を考慮して求めた。

次に堤体重量 G (tf/m) の推定は、深水波としての設計有義波を $H_0=5.2$ m, $T=8.2$ sec とし上出の各水深ごとに合田式を用いた場合について推定した。その際、ケーソン天端高は設計波に対する港内伝達波高が 0.5~0 (m) の間で、水深に反比例した値をとるように定めている。図-9 にそのようにして求めた $\bar{W}$ と G を示してある。

$\bar{W}$ は水深 5 m 以下になると碎波によって水深の減少にともない急激に減少する。一方、 G は水深 5 m までは直線的に減少し、その後は減少の度合いが鈍くなる。

次にエネルギー単価として発電単価を対象にした推定を行なう。ここで用いた単価計算は堀田ら¹⁴⁾が離島用発電のために空気タービン式について用いた算出法を、本

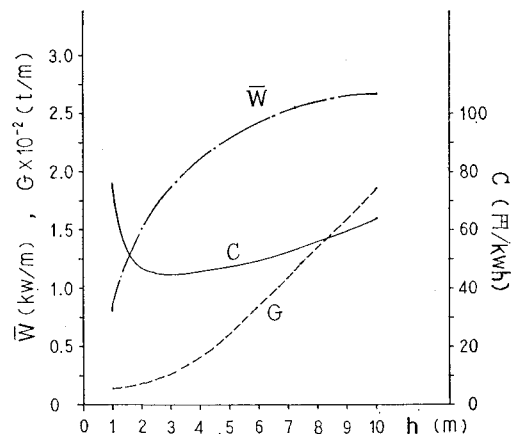


図-9 入力エネルギー、堤体重量、エネルギー単価

ケースの振り子式に適用したものである。ケーソンと発電システムの耐用年数をそれぞれ50年と15年とする。エネルギー吸収の最終効率を30%、ケーソンはRCとして100,000(円/m³)としている。金利8%、年間運転費2%、1年間完全稼働させるものとする。

そのようにして各水深ごとに求

めた発電単価C(ケーソンを除く)を図-9に示している。ただし、システム設備費は水深に比例するものとしている。この結果より、対象地点では水深3mの場合にC=46円/kWhとなり最も低い値をとる。本ケースでは深水での年平均の $\bar{W}_0=4.7\text{ kW/m}$ と入力エネルギーが小さいが、もっと $\bar{W}_0$ が大きい地点であればCは安くなり、かつ最低のCを与える水深も大きくなると推定できる。

図-10は水深3mに設置されるシステムの正面図と断面図である。

なお、同島のジーゼル発電単価は89円/kWhと推定される。

6. む す び

波浪エネルギー取得の単価を、現在のエネルギー取得単価に近づけることが、実用化を図る上で重要である。前節で示したようなケースについて、多角的にその方策を探るることによって実現の可能性が生ずると考える。今日の石油の低価格もいずれは終りとなる時代が訪れることを念頭におき、新エネルギー開発の研究を怠らないことが、エネルギー最多輸入国の我が国の技術者に課せられた責務であると思われる。

本研究は文部省科学研究費試験研究および重点領域研究によるものである。

参 考 文 献

1) 近藤・谷野・高橋・渡部・奥田: 防波施設に併設する波

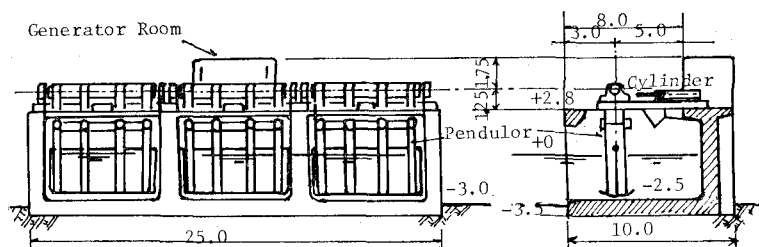


図-10 焼尻島の波浪エネルギー吸収システム案(-3.0m用)

浪エネルギー吸収装置の研究——波力水車方式——, 第28回海岸工学論文集, pp. 331~385, 1981.

- 2) 渡部・近藤・谷野・竹田・黒井: 同上(2)——振り子式——, 第29回海岸工学論文集, pp. 486~490, 1982.
- 3) 谷野・近藤・渡部: 同上(3)——実海域性能試験——, 第30回海岸工学論文集, pp. 581~585, 1984.
- 4) 近藤・谷野・渡部・倉内・松岡: 同上(4)——取得エネルギー量の推定——, 第32回海岸工学論文集, pp. 697~701, 1985.
- 5) 渡部・近藤・谷野: 沿岸固定形振り子式波力発電装置の研究(室蘭港外実験プラントの第二次運転), 機械学会論文集B, 54-497, pp. 136~141, 1988.
- 6) Yano, K., H. Kondo and T. Watabe: Method of estimating the power extracted by fixed coastal type wave power extractor, Proc. 20th ICCE, III, ASCE, pp. 2392~2404, 1986.
- 7) 谷野・近藤・渡部: 沿岸固定方式による波浪エネルギー吸収量の推定, 第2回波浪エネルギーシンポジウム論文集, pp. 2392~20404, 1987.
- 8) 3)に同じ.
- 9) Williams, A. K. and J. E. Rinne: Fatigue analysis of steel offshore structures, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 1, 60, pp. 635~654, 1976.
- 10) 2)に同じ.
- 11) 9)に同じ.
- 12) 渡辺・近藤・巖山: 離島における沿岸波浪エネルギー利用実用化計画——焼尻島のケーススタディ——, 第5回エネルギーシステム・経済コンファレンス論文集, pp. 223~228, 1988.
- 13) 近藤・渡部・奥田・松田: 離島に対する沿岸型波浪エネルギー利用システムの適用性, 第1回波浪エネルギー・シンポジウム論文集, pp. 339~149, 1984.
- 14) 堀田・石本・高橋・小宮・志岐・野間: 波力エネルギー利用技術のケーススタディ——離島用発電システムの場合——, 第2回波浪エネルギー・シンポジウム論文集, pp. 259~270, 1987.