

斜め入射波に対する振り子式波エネルギー吸収装置の出力特性

谷野 賢二*・水野 雄三**・遠藤 宣世***・高橋 哲美****

1. ま え が き

輸入化石燃料に大きく依存しているわが国のエネルギー需給体制は、社会、経済面のみならず、地球規模の環境保全の立場からも大きな転換の時期を迎えようとしている。21世紀のエネルギー需給システムは、できる限り化石燃料依存体質から脱却して、太陽、風、海洋、生物などのいわゆるクリーンエネルギーへの転換ないしは併用をめざした分散型エネルギー需給システムへの移行が必要であり、わが国の取り組むべき重要課題であると考えられる。著者らは自然エネルギー活用の観点から、波エネルギーを電力等のエネルギーに変換して利用する手段として、振り子式波エネルギー吸収装置（図-1）の

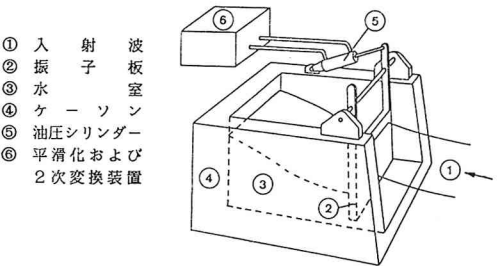


図-1 振り子式波エネルギー吸収装置の概念図

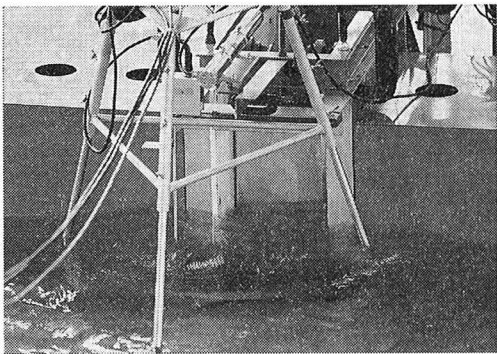


写真-1 防波堤内部に設置された振り子の模型

研究開発を行ってきた（谷野ら，1991）。

本装置の海上への配置方法としては防波堤への併設が考えられている。その場合、振り子板はケーソン前壁面より後退して配置される（写真-1）。

これは、振り子が沖側に振れたときに水室と振り子に間隙が生じないようにするためと振り子の軸受やシリンダー支点などの固定部をケーソン内部におく方が構造上有利なためである。そこで、本研究では振り子板が防波堤ケーソンの内部に設置された場合について、エネルギー吸収性能が入射波の角度によってどのように変化するかを数値シミュレーションと実験により明らかにしようとするものである。

2. 計算法の概要

(1) 解析モデル

解析モデル及び座標系を図-2に示す。ここでは、次のようなモデルについて検討する。一定水深 h の水域中に設置された島防波堤（直立堤）の中央部のケーソン1函に振り子システムが併設されている。

入射波は微小振幅波を仮定し、振り子の運動は微小とする。波動場の解析は水室の外側水域（外域）と水室内部（内域）に分けて行う。

(2) 流体力の計算

ここでは、境界積分法により、振り子システム周辺の波浪場の解析を行い、振り子に作用する流体力を求める。

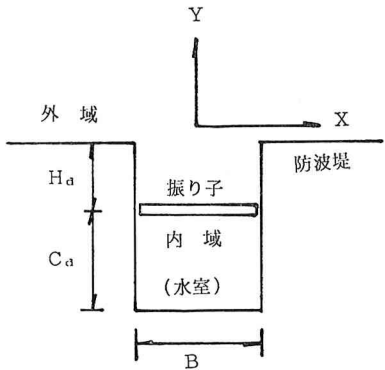


図-2 解析モデル

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所水産土木研究室
 ** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
 *** 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
 **** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室

外域の波浪場全体の速度ポテンシャル ϕ は式 (1) で与えられる。

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{iga}{\omega} \{ \phi_I(x, y, z) + \phi_S(x, y, z) \} e^{-i\omega t} + \bar{\theta} \phi_R(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

ここに、 ϕ_I , ϕ_S : それぞれ入射波および散乱波の速度ポテンシャル、 ϕ_R : 振り子運動による発散波の速度ポテンシャル、 $\bar{\theta}$: 振り子の複素振幅、 ω : 入射波の角周波数、 $i = \sqrt{-1}$, g : 重力加速度、 a : 入射波の振幅である。

未知のポテンシャル ϕ_S と ϕ_R はそれぞれ独立して求めることができる。両者の島防波堤表面上での境界条件はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } \Pi \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = -i\omega(z_0 - z)n_y \quad \text{on } \Pi_P \quad (3)$$

ここに、 Π : 振り子も含めた防波堤の外側没水面全体、 Π_P : 振り子の没水面、 $n/\partial n$: Π での法線微分、 n_y : Π 上の外向き単位法線ベクトルの y 成分、 z_0 : 振り子の支点から水面までの距離である。

グリーン関数 G とグリーンの定理を用いると、未知のポテンシャル ϕ に関する次の積分方程式を得る。

$$\frac{1}{2} \phi(P) = \iint_{\Pi} \left[\phi(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) - G(P, Q) \frac{\partial}{\partial n} \phi(Q) dS \right] \quad (4)$$

点 $P = (x, y, z)$, $Q = (\xi, \eta, \zeta)$ はともに Π 上の点である。

ϕ_S と ϕ_R についてそれぞれ積分方程式 (4) を解いて速度ポテンシャル Φ が確定すると、変動圧力 p は Φ によって

$$p = -\rho \Phi / \partial t \quad (5)$$

で表せる。ここに ρ は水の単位体積重量である。したがって、振り子に作用する波浪強制モーメント M は、

$$M = i\omega \rho e^{-i\omega t} \iint_{\Pi_P} (\phi_I + \phi_S) \bar{h} d\Pi \quad (6)$$

$$\bar{h} = (z_0 - z)n_y$$

また、振り子の運動にともなう流体から受ける反力モーメントは次式で表される。

$$M_1 = i\omega \rho \bar{\theta} e^{-i\omega t} \iint_{\Pi_P} \phi_R \bar{h} d\Pi \quad (7)$$

ここで、 M_1 を振り子の速度と加速度に比例する項に分解して、

$$M_1 = -(I_1 \ddot{\theta} + N_1 \dot{\theta}) \quad (8)$$

と定義する。ここに、 $\ddot{\theta} = d^2\theta/dt^2$, $\dot{\theta} = d\theta/dt$ であり、 I_1 は付加慣性モーメント係数、 N_1 は造波減衰モーメント係数と呼ばれる。 I_1 , N_1 はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{\omega^2} R_e \left[i\omega \rho \iint_{\Pi_P} \phi_R \bar{h} d\Pi \right] \\ N_1 &= \frac{1}{\omega} I_m \left[i\omega \rho \iint_{\Pi_P} \phi_R \bar{h} d\Pi \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

同様に、内域（水室）の発散波 ϕ' による流体モーメントおよび付加慣性モーメントと造波減衰モーメント係数は以下のように表される。

$$M_2 = i\omega \rho \bar{\theta} e^{-i\omega t} \iint_{\Pi_P} \phi' \bar{h} d\Pi \quad (10)$$

$$= -(I_2 \ddot{\theta} + N_2 \dot{\theta}) \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{\omega^2} R_e \left[i\omega \rho \iint_{\Pi_P} \phi' \bar{h} d\Pi \right] + \frac{K_2}{\omega^2} \\ N_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(12) 式の右辺第 2 項は水室内の平均水位が振り子の運る動で変化するための補正項である。平均水位の変化による流体モーメントは振り子の変位に比例し、比例常数 K_2 (復元モーメント係数) は次式で表される。

$$K_2 = \frac{\rho g h^2 (z_0 + h/2)^2 B}{C_a} \quad (13)$$

ここに、 B : 振り子幅、 C_a : 水室奥行である。

(3) 運動方程式と変換エネルギー

振り子に作用する流体力が確定すると、振り子の運動方程式は次式で示される。

$$(I + I_1 + I_2) \ddot{\theta} + (N + N_1) \dot{\theta} + (K + K_2) \theta = M \quad (14)$$

ここに、 I , K , N はそれぞれ振り子の慣性モーメント、復元モーメント係数、負荷の減衰モーメント係数である。

上式を解いて振り子の複素振幅 $\bar{\theta}$ が求まると、振り子が一周期間に吸収するエネルギーの平均、すなわち吸収パワー W は次式で求まる。

$$W = (1/2) \omega^2 N |\bar{\theta}|^2 \quad (15)$$

振り子の吸収パワーは、普通、単位峰幅当りの入射波のパワーによって無次元化され、次式で示されるエネルギー吸収係数 ν で表示される。

$$\nu = \frac{W}{(1/2) \rho g a^2 c_g B} \quad (16)$$

3. 実験装置および方法

実験には、図-3 に示す開発土木研究所の 30 m × 23 m の平面水槽で行った。この水槽には、造波板幅 2.5 m の造波機が 8 台設置されている。実験に使用した模型は水平床に設置した長さ 15.4 m の島堤に振り子装置を組み込んだものであり、防波堤構造としてはマウンド無しの直立堤とした。振り子装置には振り子板の回転角と負荷による反力を計測するための変位計と荷重計が取り付けられている。また、振り子板に対する負荷を自由に設定できるように絞りを設けている。振り子板の幅 B は 25 cm、水室奥行 C_a は 45 cm で一定とした。ハーバー奥行 H_a は 10, 20, 40 cm の 3 種類、入射角度は 0, 30, 45, 60° の 4 種類とした。実験水深 h は 40 cm である。実験波は規則波が 2 周期 ($T = 1.3, 1.8$ s)、不規則波が 1 周期 ($T_{1/3} = 1.8$ s) である。波高は 10 cm で一定とした。

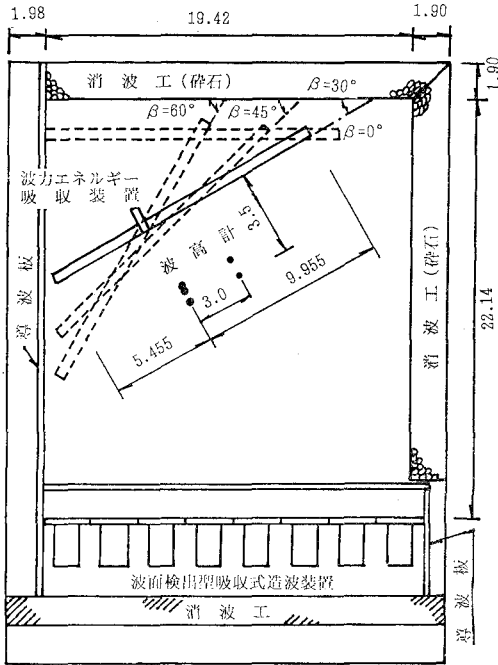


図-3 実験水槽と模型の配置

島防波堤の場合、入射角度により同一地点でも重複波の波高が異なる (合田ら, 1971)。そこで、予め防波堤前面の波高分布を求め、入射角度ごとの波高が一致するように振り子の設置位置を決めた。

模型実験では、入射波条件に対して、最大のエネルギー吸収係数を得ることができるように負荷を予め設定することが難しいので、最大エネルギー吸収係数は負荷を変えた実験を繰り返して求めた。

振り子の単位時間当りの平均吸収パワーは次式で求めた。

$$W = \frac{1}{T^*} \int_0^{T^*} F_S V_S dt \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 F_S : シリンダーの反力、 V_S : シリンダーの速度、 T^* : 観測時間である。

4. 結果と考察

(1) 振り子幅とハーバー奥行の効果

本節では振り子の最適な振り子幅とハーバー奥行を検討する。振り子システムの実際の配置は、通常は防波堤等への組み込み型となるものと考えられる。その場合、先に検討したような無限に長い防波堤ではなく有限の長さの防波堤の一部として配置されることになる。その場合、防波堤周辺では位置により波高が異なるため、防波堤法線上のどこに配置するかによって、吸収性能が変化する。したがって、入射角度に対する振り子幅員やハーバー奥行きの効果の推定は、個々の事例に即して検討されるのが望ましいが、ここでは1つのモデルを使ってそ

表-1 計算条件

諸元	数値	諸元	数値
I	$3.4 \times 10^4 (\text{kg} \cdot \text{m})$	水室奥行	5.0 (m)
K	$6.0 \times 10^4 (\text{N} \cdot \text{m})$	水深	5.0 (m)
振り子個数	1	入射波周期	2.8~20 (s)
振り子幅員	5 (m)	波高	1 (m)
島防波堤延長	50 (m)	ハーバー奥行	0~10 (m)

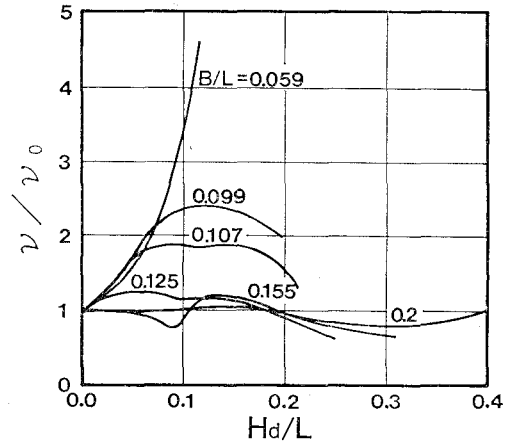


図-4 吸収性能に及ぼす振り子幅員とハーバー奥行の効果

の効果を検討する。

モデルとして、長さ 50 m、幅 15 m の島防波堤の中央部に振り子システムを併設したケーソン 1 函が置かれているとする。振り子幅員を 5 m に固定し、ハーバー奥行を 0~10 m まで、周期を 2.8 s~20 s まで変化させて、吸収性能の変化を調べた。負荷減衰係数は最適負荷係数とした。

計算条件を表-1 に示す。

図-4 は横軸にハーバー奥行 H_d と波長 L の比 H_d/L をとって、パラメーターとして振り子幅員と波長の比 B/L をとったときの 変換係数の変化を示したものである。縦軸は各 H_d/L における変換係数を $H_d/L=0$ における変換係数で除してある。本計算例では、ハーバーの効果は B/L が小さいほど高く、 $B/L > 0.12$ ではほとんど効果がないことが分かる。また、 $B/L < 0.11$ では $0.1 < H_d/L < 0.2$ のときハーバーは最も効果的である。入射角による変化率の差はほとんど見られなかったため図は示していない。試設計の段階でこうした検討を行うことにより、振り子幅やハーバー奥行の合理的な決定が可能となる。

(2) 波向きによる出力の変化

図-5、図-6は、入射波の角度をパラメーターにとつて、ハーバー奥行に対する波浪強制モーメント M の変化の実験値をプロットしたものである。 $H_a=0$ におけるモーメント M_0 で除して無次元化している。これらの図から、規則波、不規則波の場合とも H_d/L あるいは

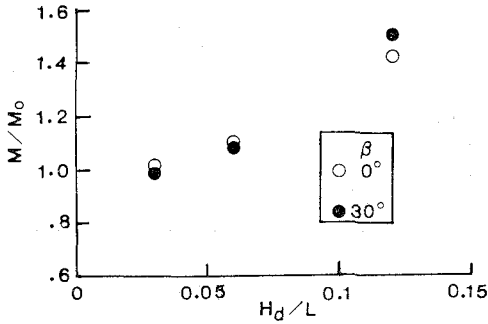


図-5 ハーバー奥行による波浪強制モーメントの変化 (規則波)

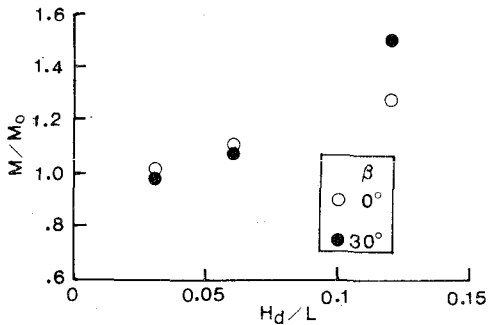


図-6 ハーバー奥行による波浪強制モーメントの変化 (不規則波)

$H_d/L_{1/3}$ の増加につれて、波浪強制力の増加がみられる。また、入射角度による差は小さい。

図-7 および図-8 は横軸に波向をとって、それぞれ規則波および不規則波実験におけるエネルギー吸収係数 ν の変化を示したものである。パラメーターは H_d/L あるいは $H_d/L_{1/3}$ である。縦軸各 H_d におけるエネルギー吸収係数を $H_d=10$ cm ($T=1.3$ s のとき $H_d/L=0.05$, $T=1.8$ s のときに $H_d/L=0.03$) におけるエネルギー吸収係数 ν_0' で除してある。図-7 には数値シミュレーションの結果を曲線で併せて表示している。

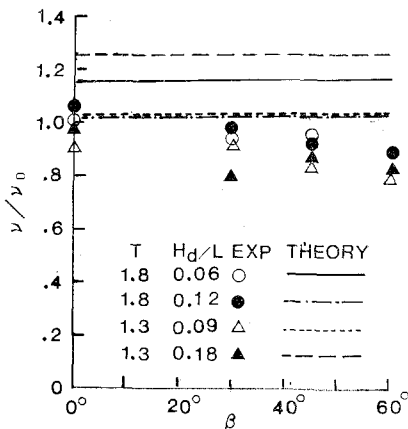


図-7 波向による出力の変化 (規則波)

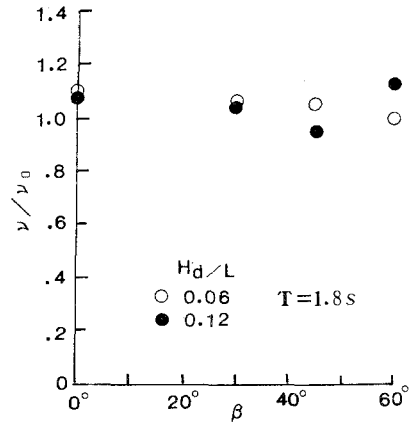


図-8 波向による出力の変化 (不規則波)

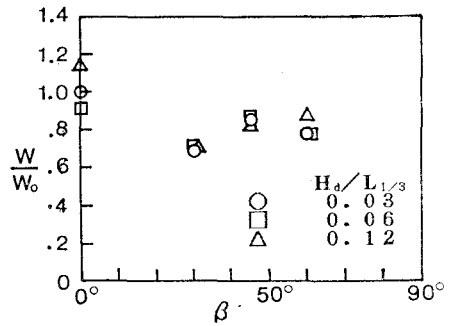


図-9 波向による吸収パワーの変化 (不規則波)

これらの図からわかるように、今回の実験の範囲内では、波浪強制力が増加しているにも関わらず、吸収エネルギー量は増加せず、ハーバーの効果は見られなかった。入射角度が ν に及ぼす影響は小さいが、入射角度が増加するにしたがって漸減する傾向にあった。エネルギー吸収係数の最大値は入射角が 0° の時に得られ、規則波で 1.2、不規則波でも 1.1 と両者の差は小さく、ともに高い吸収性能を示した。

図-9 は不規則波実験における波向による吸収パワーの変化を示したものである。縦軸は各 $H_d/L_{1/3}$ における W_0' で除してある。

5. あとがき

振り子式波エネルギー吸収装置が防波堤内部に設置された場合について、装置の性能が入射波によってどのように変化するかを、数値シミュレーション及び 3 次元模型実験により検討した。その結果、

①斜め入射波に対する装置のエネルギー吸収特性について、数値シミュレーションにより明らかにした。②数値シミュレーションと実験によれば、振り子システムは入射角度による性能変化が小さい。③エネルギー吸収係

数の実験値の最大は入射角が 0° の時に得られ、規則波で 1.2, 不規則波でも 1.1 と両者の差は小さく、ともに高い吸収性能を示した。

参 考 文 献

- 合田良実・吉村知司・伊藤正彦 (1971): 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港研報告, 第10巻 第2号, pp. 3-52.
- 谷野賢二・水野雄三・遠藤宣世・梅沢信敏・高橋哲美 (1991): 耐波壁を有する振り子式波パワー吸収装置の水理特性について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 806-809.
-