

砂浜海岸の波浪発電・海岸保全ハイブリッドシステムの 三次元特性

山内 功*・沖 岳大*・孟 昭武***
藤間 聡**・近藤 俊郎***・浦島 三郎****

1. はじめに

室蘭工業大学では振り子式波浪エネルギー吸収システムを開発し、海域実証実験を行って、その高効率性と低コスト性を明らかにしてきた。さらに沿岸域で波浪エネルギーを吸収することにより海岸侵食量を減少させる離岸堤の機能を有するシステムを提案し、二次元特性を明らかにした(近藤ら, 1998)。本論文は、二次元特性から得られた構造形式を用いて、平面水槽実験を行い、三次元的な波浪特性、およびエネルギー吸収効率について検討した。また、実際に構造物を設置する際に必要となる、海底地形変化や波力特性実験について二次元実験を行った。さらに取得される電力については、発電コストのみの経済性ではなく、環境修復や社会的な費用を考慮したトータル的な経済性についても石油火力発電や他の自然エネルギーと比較検討を行った。

2. システムの基本構造

従来の振り子式波浪エネルギー吸収システムは、コンクリートケーソンの前壁の代わりに振り子板を設置した構造となっており、防波堤に付設もしくは組み込まれる形式のものである。砂浜海岸において海岸侵食抑止の機能を持たせるためには、海岸への入射波エネルギーを減少させると同時に構造物による局所的な漂砂への影響を少なくする必要がある。そこでシステムの構造条件として以下のように設定した。

1) 年平均入射波エネルギーの配分目標を、平面配置を考慮しない条件について反射 30%, 吸収 40%, 伝達 10%とする。

2) エネルギー吸収装置には高効率である振り子式を用い、エネルギー変換にはロータリーベーンポンプを採用する。

3) 沿岸漂砂に支障が少なく、かつ岸沖漂砂も通過できる構造とする。

4) 大波浪時には振り子を固定するものとし、その状

態においても直立離岸堤としての機能を有し、システムが倒壊しない構造とする。

以上の条件を満たすものとして、図-1 のような杭、後壁(カーテンウォール)と従来の振り子からなる脚柱構造形式を用いる。この構造は従来のケーソン型と比較すると側壁と底板が無いので、沿岸方向の漂砂移動にほとんど影響が無い。岸沖方向については掃流砂を大きく阻害しないように、没水後壁はその下端と地盤との間に隙間(クリアランス)を設ける構造としている。

3. 波浪特性及び効率実験

3.1 実験方法

実験水槽(20×8×0.7 m)に脚柱型振り子模型を三基設置し、その前後に波高計を設置した。水槽の側壁には反射を押さえるため消波工を設置し、構造物の後方には消波のための直立透過消波工と緩傾斜の砂斜面を設けた。全体の配置図を図-2 に示す。脚柱型振り子模型はステップから 265 cm, 水槽中央部に 35 cm 間隔で造波板に対し平行に並べ、中央の振り子模型にロータリーベーンポンプ模型を設置した。図-3 に振り子模型図を示す。二次元実験結果より振り子と後壁の距離 B が波長 L の $1/4$ のとき高いエネルギー吸収効率を得られているので、本

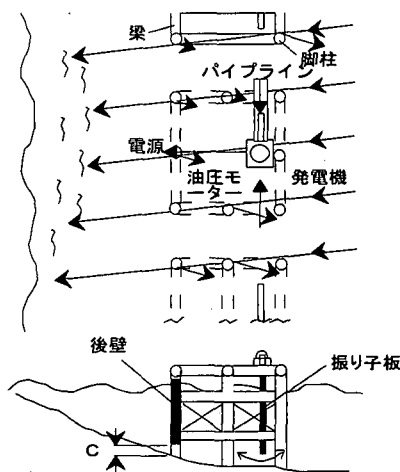


図-1 ハイブリッドシステム概念図

* 学生会員 室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻
** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
*** フェロー 工博 室蘭工業大学名誉教授
**** 正会員 工博 苫小牧工業高等専門学校助教授 環境都市工学科

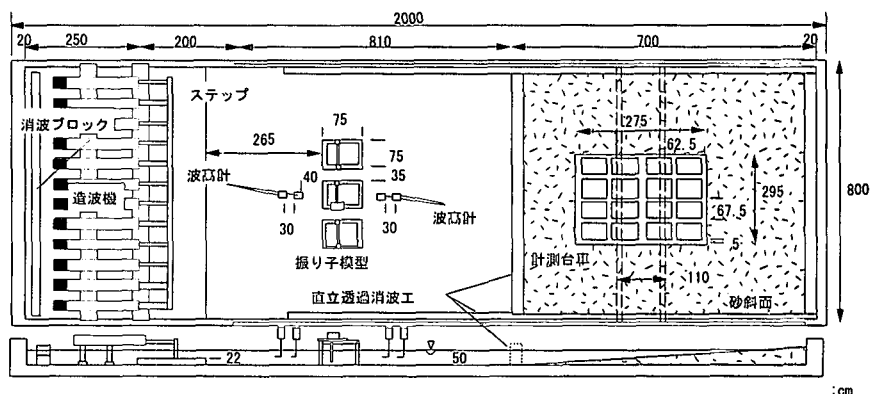


図-2 実験配置図

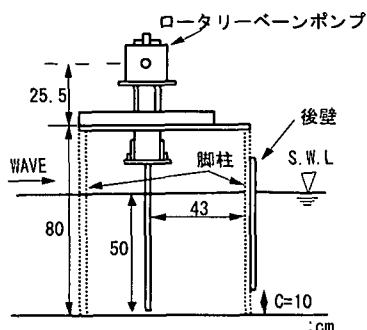


図-3 振り子模型

研究では周期 1.12 s の 1/4 波長である $B=43$ cm として実験を行った。水槽底部と後壁下端の間隔、クリアランスは二次元水槽実験での効率結果が最も高かった条件である 10 cm を採用し、天端高も同様に 10 cm とした。模型縮尺を 1/20 とし、実験波の諸元は、規則波、不規則波を用い、波高：5 cm、周期： $T=1.0\sim 1.79$ s の 4 種類、波向 $\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ である。不規則波にはプレットシュナイダー・光易スペクトルを用いた。

ロータリーベーンポンプと油タンクの連結部に付いている弁の開度を調整することにより内部圧力を変化させ、振り子の荷状態を変化させた。また比較対象として脚柱構造物に側壁を取り付け、クリアランスのみを設けた準二次元型に同様な実験を行った。ロータリーベーンポンプ式振り子模型に角度計と歪み測定機を取り付け、角速度と軸トルクを測定し、これより一次変換効率を算定する。模型前後に設置した波高計より入射波高を測定し、前面波高比、反射率、伝達率を求める。

単位時間の間に油圧ポンプが吸収するパワーの平均値 E_p は次のように表される。

$$E_p = \frac{D_p}{2\pi\eta_1 t_0} \int_0^{t_0} P_p \dot{\theta} dt \quad (1)$$

$$= \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} T_p \dot{\theta} dt \quad (2)$$

ここで D_p ：油圧ポンプの押しのけ容積、 P_p ：油圧ポンプの吐出圧、 η_1 ：油圧ポンプのトルク効率、 T_p ：ポンプ軸トルク、 $\dot{\theta}$ ：振り子の角速度である。幅 B_p の振り子に入射する波の平均パワー $B_p W$ は下式より推定した。

規則波： $B_p W = E \cdot C_p B_p$

$$= \frac{1}{8} \rho g H_1^2 \left[\frac{2\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] B_p \quad (3)$$

不規則波： $B_p W = (0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3}) B_p \quad (4)$

一次変換効率 η_1 は、波の入射パワー $B_p W$ に対する吸収パワー E_p の比であるから、次の式により求められる。

3.2 反射・伝達波特性

図-4 は不規則波、振り子前面部における波高を入射波高で割った波高比を入射角度別に表したものである。ポンプの荷状態は全体でもっとも結果のよい中負荷とする。横軸は振り子と後壁の距離 $B (=0.43$ m) を一定として入射波周期変化させ、相対幅員 B/L の関係で示している。 $\beta=0^\circ$ では B/L が大きくなるごとに波高比、すなわち反射は大きくなり、 $B/L=0.25$ で最大値を示している。他の角度 $\beta=15^\circ, 30^\circ$ では、それぞれ周期による特異な点がみられたが、それ以外においては B/L に関係なくほぼ一定の値となっている。図-5 は二次元実験結果と準二次元型、脚柱構造 $\beta=0^\circ$ の結果である。準二次元型が二次元実験結果に比べ少し大きな値になっているが、これは振り子幅よりも後壁の間隔を広くとっているため、そこからの反射によるものと考えられる。準二次元型と比較すると B/L の大きな所でいくつか超えている点もあるが、ほとんどの条件において反射率は下回っている。二次元実験結果とはほぼ一致している。

図-6 は不規則波、中負荷の伝達率を入射角別に表したものである。隣り合った構造物間からの波の透過、また回折によって非常に高い分布となっている。 $\beta=15^\circ, 30^\circ$ となるごとに遮蔽率が大きくなるため伝達率の低下が見られた。図-7 より準二次元型と比較すると、脚柱型

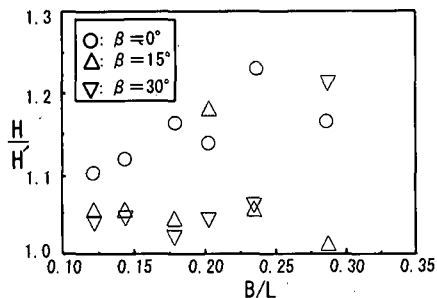


図-4 前面波高比 (不規則波, 負荷有)

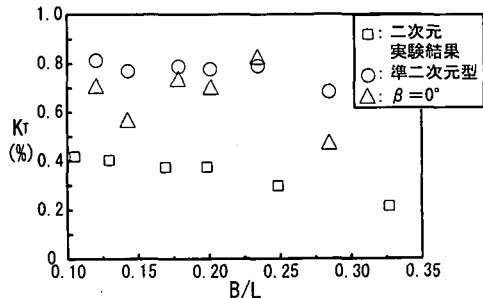


図-7 伝達率 (不規則波, 負荷有)

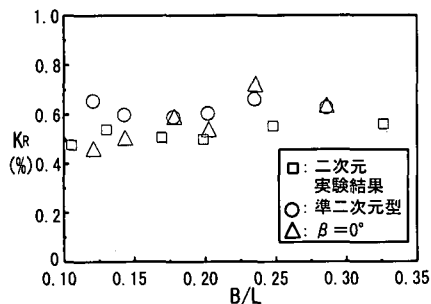


図-5 反射率 (不規則波, 負荷有)

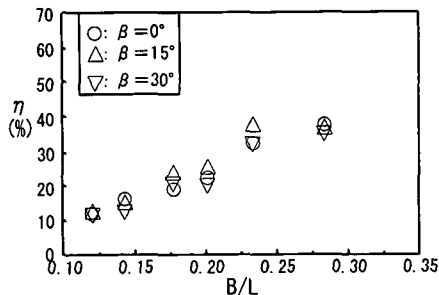


図-8 一次変換効率 (不規則波, 負荷有)

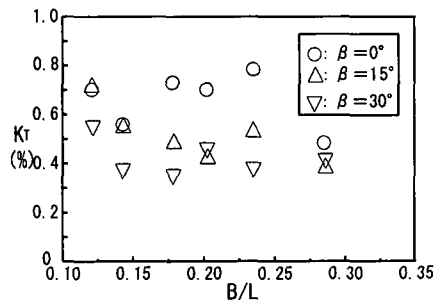


図-6 伝達率 (不規則波, 負荷有)

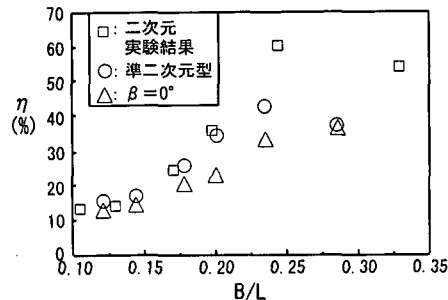


図-9 一次変換効率 (不規則波, 負荷有)

ではほとんど差はなかった。これより伝達率では側面からのエネルギー流出の影響は小さいと言える。二次元実験結果と比較すると約2倍もの差がある。しかし、ブロック式離岸堤における目標波高伝達率0.5とでは、0.2程度大きい、間隔を狭めることにより伝達率の低下が考えられるので、離岸堤と同程度の機能が予想される。

3.3 効率特性

一次変換効率の結果は、図-8より振り子と後壁の距離が周期の1/4波長で最も吸収効率がよいと考えられているが、今回の実験でも $B=43\text{ cm}$ の約4倍の波長を持つ周期1.12 sとそれに近い1.00 sで高い効率が得られている。角度別で見ると、 $\beta=15^\circ$ が 0° より大きくなっている所があるがその差は小さく、入射角の違いによる一次変換効率の違いは今回の実験では顕著には見られなかった。図-9から $\beta=0^\circ$ を準二次元型と比較すると、全体的に側壁の影響は5%程度の低減で収まっている。二

次元実験の振り子の設置状態は振り子と後壁の距離が60 cmで、周期1.34 sの波長の1/4をとっているため、 $B/L=0.25$ で一次変換効率が最大となっている。また、二次元水槽で行った実験結果と比較すると、 B/L が小さい範囲では効率はほとんど同じ値となっているが、 B/L が大きくなるとかなりの低下が見られた。

4. 波力及び洗掘実験

4.1 実験方法

波力特性実験は平面実験で用いた脚柱型振り子模型を二次元水槽に設置し、波浪条件は波高10 cm、周期1~2.68 sの範囲で8種類とし、振り子無し状態、無負荷状態、負荷有状態での水平、鉛直波力を三分力計によって計測した。波力の計算値には板部分を合田式、脚柱部分にモリソン式を用いている。また、後壁下部の局所的流れとなる部分においての水底床への影響について

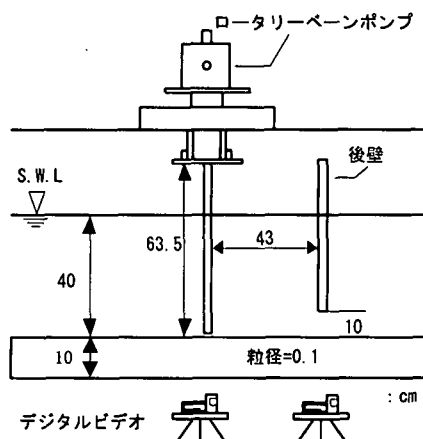


図-10 海底地形変化の実験状況

図-10 に示すような移動床実験を行った。まず、後壁のみを設置した単一カーテン壁実験を行い、洗掘されていく過程をデジタルビデオカメラで撮影を行い、画像処理をし、侵食量を定めた。次いで振り子を設置したハイブリッドシステム実験についても同様な方法により行い、振り子下部、後壁下部について侵食量を定めた。この結果より洗掘状況、エネルギー逸散量について把握する。

4.2 波力特性

図-11, 12 は脚柱型振り子式システム模型全体にかかる水平、鉛直方向の無次元波力を示している。水平波力は h/L が小さくなるごとに大きな値を示している。脚柱構造物に振り子を設置した場合、無負荷、負荷有状態ともに波力の低減が見られた。また無負荷、負荷有では大きな差はなかったものの若干負荷有の方が波力は大きくなっている。計算値が実験値を上回った原因として、天端部からの越波やクリアランス部からのエネルギー流出の過小評価が考えられる。鉛直波力は、少しながらが周期による変化が見られ、振り子の有無による波力の変化は後壁のみの状態でわずかながら大きくなっている。しかし、脚柱型振り子式システムの鉛直方向における投影面積が小さいため、水平波力と比べ非常に値は小さい。そのため、鉛直波力において振り子による影響を考慮する必要はない。

4.3 後壁下部の洗掘実験

ハイブリッドシステムの後壁下部および単一カーテン壁下部の洗掘状況について図-13 に示す。図は撮影された地形を画像処理し、スケッチしたものである。図に示されるように後壁下部の地形は、ハイブリッドシステム、単一カーテン壁ともに下に凸の放物線状に近い地形を形成する。また洗掘深は、同一時間経過後において、ハイブリッドシステムが、単一カーテン壁よりも洗掘深を小さくすることが明瞭にわかる。これは振り子運動により、

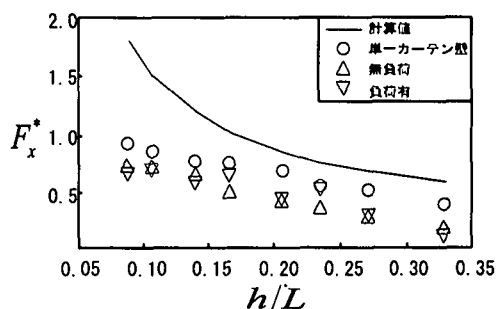


図-11 構造物に作用する水平波力

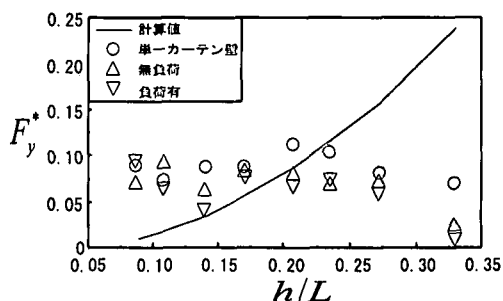


図-12 構造物に作用する鉛直波力

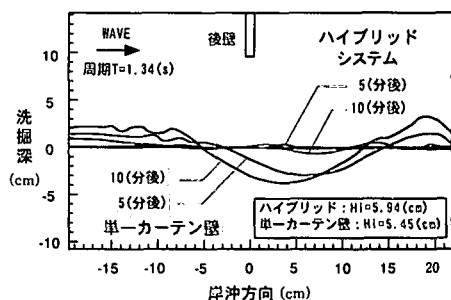


図-13 洗掘状況図

波エネルギーが吸収され、侵食を抑制する効果があるためである。次にハイブリッドシステムと単一カーテン壁のそれぞれについて、洗掘による入射波エネルギーの消散率 τ_e/E の算定法を以下に示す。まず、実験により得られた侵食量 Q_b (m^3/s) を、(6) 式を用いて ϕ_b に無次元化する。ここで d (m) は砂の中央粒径、 g (m/s^2) は重力加速度である。

$$\phi_b = Q_b / d \sqrt{(s-1)gd} \quad \dots\dots\dots (6)$$

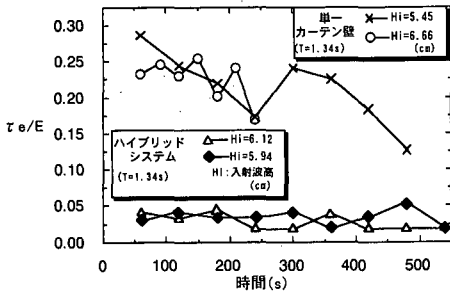
またシールズ数 θ は、Peter Nielsen (1992) により (7) 式で与え、 θ_c は限界シールズ数 ($=0.05$) である。

$$\theta = (\phi_b/8)^{2/3} + \theta_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

以上の (6) (7) 式を用い、掃流力 τ_e (kg/s^2) は、(8) 式で算定される。ここで ρ (kg/m^3) は水の密度である。

$$\tau_e = \theta (\rho(s-1)gd) \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、入射波エネルギー E は (9) 式である。ここで



図—14 侵食エネルギーの時間変化

H_i は、入射波高である。

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_i^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで入射波エネルギー E (kg/s^2) と掃流力 τ_e (kg/s^2) は、同次元であり、掃流力 τ_e は砂地盤を洗掘する侵食エネルギーと考えられる。洗掘による入射波エネルギーの消散率 τ_e/E と時間変化の関係を図—14 に示す。

図—14 より、ハイブリッドシステムは、単一カーテン壁と比べ、侵食エネルギー τ_e を十分に減衰させる効果があると確認でき、また消散率の時間変化は微小であり、動的平衡状態と考えられる。

5. 経済評価

発電コスト P_g の推定は近藤ら (1998) の計算法に準じて行う。年発電量は年間の入射波エネルギー・パワーに基づき推定する。発電装置ロータリーベーンポンプによる振り子式とし、入射エネルギーから電気までの総合効率は、三次元効率実験の結果を用いて 25% とする。耐用年数は土木構造物と発電施設についてそれぞれ 50 年、15 年とする。推定結果は表—1 の右端となった。ここで P_g は環境コスト、 P_s は社会コストである。これによれば P_g 、 P_t とも関東が最も安く、次いで東北、北海道の順である。環境コストは環境劣化の場合は (+) で、環境を改善する場合は (-) となる。表—1 中の上段は、年間の海岸侵食量を養浜によって修復する費用から算定し、下段は護岸費用から推定した。以上の結果は利率を年 6% としているものである。エネルギーコストは利率に敏感であり、利率が 2% のときのコストは表—2 のようになる。 P_g の上段、下段の値は表—1 と同じ意味である。火力発電の場合の環境コストとしては、 CO_2 の処理の費用の差から計算された。表—3 は波浪とその他の海洋エネルギー、風力ならびに石油火力とのコスト比較をした。この結果よりトータルコストでは風力発電を上回り、火力発電の 1.4 倍となった。

6. まとめ

1) 一次変換効率では入射波向の違いによる変化は大

表—1 発電コスト P_g とトータルコスト P_t (円/kWh)

海岸	P_g	P_e	P_s	P_t
北海道	60.0	-2.6	0.6	58.0
		-18.0	0.6	42.4
東 北	58.0	-10.2	0.6	48.4
		-16.0	0.6	42.6
関 東	46.0	-12.5	0.9	34.4
		-11.0	0.6	35.9

表—2 利率 2 (%) の場合のコスト (円/kWh)

海岸	P_g	P_e	P_s	P_t
北海道	39.0	-2.6	0.3	36.7
		-14.0	0.3	25.3
東 北	37.0	-10.2	0.3	27.1
		-13.0	0.3	24.3
関 東	31.4	-12.5	0.6	19.5
		-8.0	0.6	24.0

表—3 エネルギー種別による各種コスト (円/kWh)

種類	地域	P_g	P_e	P_s	P_t	$P_t/P_{t,0}$
波浪	関東	46.0	-12.5	0.9	34.4	1.4
海流	津軽海峡	33.3	3.3	1.0	37.0	1.5
潮汐	有明海	23.0	3.7	2.2	78.9	3.2
風力	室蘭	36.0	0.0	1.0	37.0	1.5
石油火力	関東	12.0	12.0	1.0	25.0	1.0

きく現れなかった。準二次元型と比較すると 5% 程度の効率低下、二次元実験結果とでは B/L が大きい範囲で 15~20% の低下となった。

2) 伝達率が回折波の影響のため目標であるエネルギー伝達率 10% (波高伝達率 0.32) を大きく超えている。しかしブロック式離岸堤の目標である吸収 30%、伝達 25% (波高伝達率 0.5) との比較では 0.2 程度であった。

3) ハイブリッドシステムは振り子が波エネルギーを吸収することにより単一カーテン壁と比べ波力を低減し、また、下部の侵食を十分抑制する効果が確認できた。

4) 本システムによって得られる電力のコストは関東太平洋岸が最も安価で、発電コストとトータルコストはそれぞれ 46, 34 (円/kWh) となった。これを石油火力発電と比較すると発電コストは 3.2 倍で高いがトータルコストは 1.4 倍まで低下し、ここで取り上げ事例では風力より有利となる。

参 考 文 献

- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, 275 p.
- 近藤俊郎・藤間 聡・加藤 満・飯島 徹・渡部富治・浦島三朗・太田典幸 (1998): 波浪発電と海岸保全のためのハイブリッドシステム, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1226-1230.
- 近藤俊郎 (2000): 波浪発電と海岸保全のための新形式消波システムの開発, 科学研究費補助金研究報告書 (基盤研究(A) (2)), 82 p.
- Nielsen, Peter (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific. pp. 95-128.