

既設防波施設を利用した振り子式波力発電の提案

Proposal of wave power extraction utilizing existing coastal structure by Pendulor system

苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 ○正 員 浦島 三朗 (Saburo Urashima)
 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 名誉会員 近藤 俣郎 (Hideo Kondo)
 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 正 員 川森 晃 (Akira Kawamori)

1. まえがき

室蘭工業大学のグループは防波堤と兼用できる波力発電システムとして振り子式システムを開発し、室内実験および実海域での試験を実施し、その高効率性と安定性を確認した^{1),2)}。また、振り子式変換システムを収納する開口ケーソンは、エネルギー吸収により従来の直立型防波堤に比べ、水平および鉛直波力が小さくなっていることを室内実験と実海域の試験で明らかにした³⁾。

本論文は、この特性を利用して、既設の直立型防波堤や護岸、もしくは混成防波堤直立部の沖側に振り子式発電用開口ケーソンを設けるシステムを提案し、発電コストを試算し、その有効性を確認する。

2. 三種のシステムと作用波力

既設混成防波堤を対象に、その前方におく図-1に示すような3種の開口ケーソンを対象とする。

Aは既設の防波堤が充分安定な場合であり、開口ケーソンによる波力減少は期待しなくとも良い場合である。開口ケーソンは軽重量で良く、鋼製が考えられる。Bは既設防波堤の安定度が低くて、近い将来に補強することが必要な場合であり、鉄筋コンクリート製となる。Cは浮上形として研究されたもの⁴⁾を適用した案で、既設防波堤前方への拡幅が制約され、開口ケーソン幅を狭くしなければならない場合であり、吸収エネルギー量はA、Bよりも減少する。以後はAとBについて検討する。

2.1 振り子式開口ケーソンの波力

振り子式開口ケーソンに作用する波力について筆者らは、室内実験と実海域試験の結果から波力式を提案している。図-2のように水室の数が N の開口ケーソンに対する水平波力と揚圧力については下式で示される³⁾。

(1) 水平波力

ケーソン全体に作用する全水平波圧 P_H は、次式で与えられる。

$$P_H = 2P_{sw}d_{sw} + (N-1)P_{Dw}d_{pw} + NC_wP_p \quad (1)$$

ここで、 P_H はケーソン全体についての全水平波圧、 P_{sw} 、 P_{Dw} 並びに P_p は、それぞれ側壁、隔壁並びに振り子板に作用する単位幅員当りの水平波圧、 d_{sw} 、 d_{pw} 並びに C_w はそれぞれ側壁、隔壁並びに水室の幅員である。

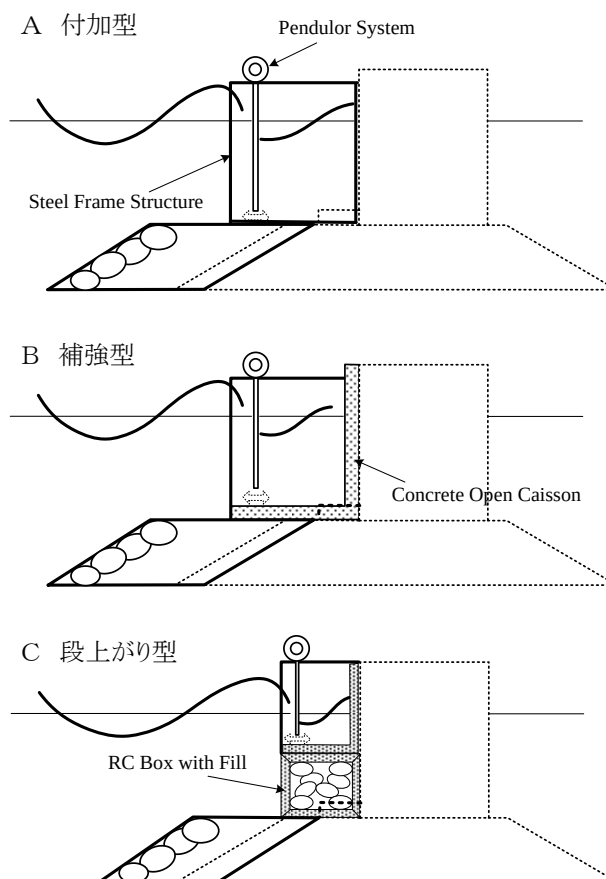


図-1 三種類のシステムの概略断面図

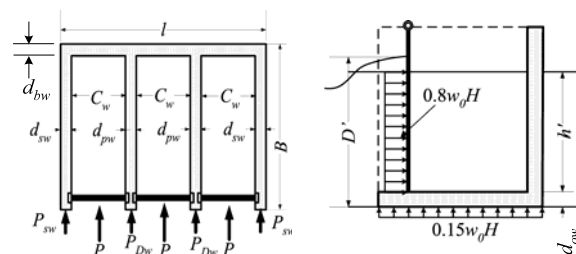


図-2 開口ケーソンの波力（岸向き）

また、 P_p は次のように表現される。

$$\begin{aligned} P_p &= p_{pl} D' \\ p_{pl} &= 0.8w_0 H \\ D' &= h' + d_{ow} + 1.25H \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 w_0 は海水の単位体積重量、 H は波高、 h' は水室水深、 d_{ow} は底版の厚さである。

(2) 揚圧力

開口ケーソンの底版に作用する揚圧力は下式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_U &= p_u l B \\ p_u &= 0.15w_0 H \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 l と B は、ケーソンの長さと幅員である。

2.2 複合構造体の波力

式(1)～(3)による開口ケーソンの波力と、混成防波堤の波力についての広井式を用いて、既設防波堤直立部と開口ケーソンからなる複合構造体の波力は以下のように推定される(図-3)。

(1) 水平波力

開口ケーソンが既設防波堤に剛結されていることを前提にするならば、水平波圧は式(1)で与えられる。 P_{sw} と P_{Dw} については、次式を採用する。

$$P_{sw} = P_{Dw} = 1.5w_0 H D' \quad (4)$$

これより P_H は

$$P_H = [1.5(l - NC_w) + 0.8NC_w]w_0 H D' \quad (5)$$

(2) 揚圧力

底部揚圧力は図-3に示されるように、開口ケーソンと既設直立部に作用する両者からなる。後者は、海側端揚圧力強度を前者と等しいとし岸側端をゼロとして求めることとすれば、複合構造全体では下式で表される。

$$P_U = \left[0.15B + \frac{1}{2} \cdot 0.15B_o \right] w_0 H l \quad (6)$$

2.3 既設防波堤との波力の比較

複合構造物の波力と既設防波堤の波力の比は、以下のように推定される。ここで、添え字 o は、既設防波堤を示している。

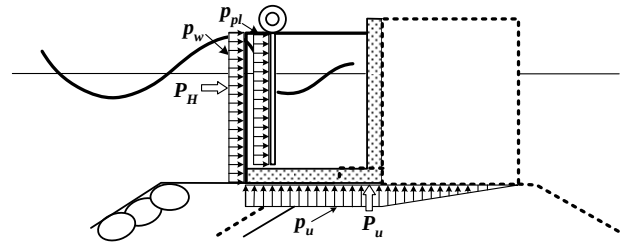


図-3 合成構造物の波力分布

(1) 水平波力

$$P_H / P_{Ho} = 1 - 0.47 \cdot \left(NC_w / l \right) \quad (7)$$

一般的に $(NC_w / l) \geq 0.8$ ，であるから

$$P_H / P_{Ho} < 0.6 \quad (8)$$

(2) 揚圧力

$$P_U / P_{Uo} = 0.12 + 0.24 \cdot \left(B / B_o \right) \quad (9)$$

一般的に $(B / B_o) \leq 1$ ，を想定すると

$$P_U / P_{Uo} < 0.36 \quad (10)$$

式(8)、(10)から、合成構造物の全波力は既設防波堤の全波力に比べて、水平波力で約30%、揚圧力で約60%となる。以上の結果から、滑動安定限界波高は約2倍に増加することが期待できる。

2.4 既設防波堤との接続方法

近藤ら⁵⁾は、既設防波堤と新たに付加する構造物の接続方法について提案している。付加型のケースの場合は、アンカーボルトで既設防波堤と鋼製フレーム開口ケーソンを固定し、補強型のケースの場合は、既設防波堤と鉄筋コンクリート開口ケーソンの間隙に水中コンクリートを打設して固定する方法を提案している。

2.5 構造特性

(1) 鋼製フレーム(A型)

図-1に示す鋼製フレームを用いた付加型(A型)の場合、波力は前述の複合構造体の波力として求めることができる。今、図-4に示すように長さ5m、幅員10mからなる鋼製フレーム開口ケーソンを4つ連結した例を考える。

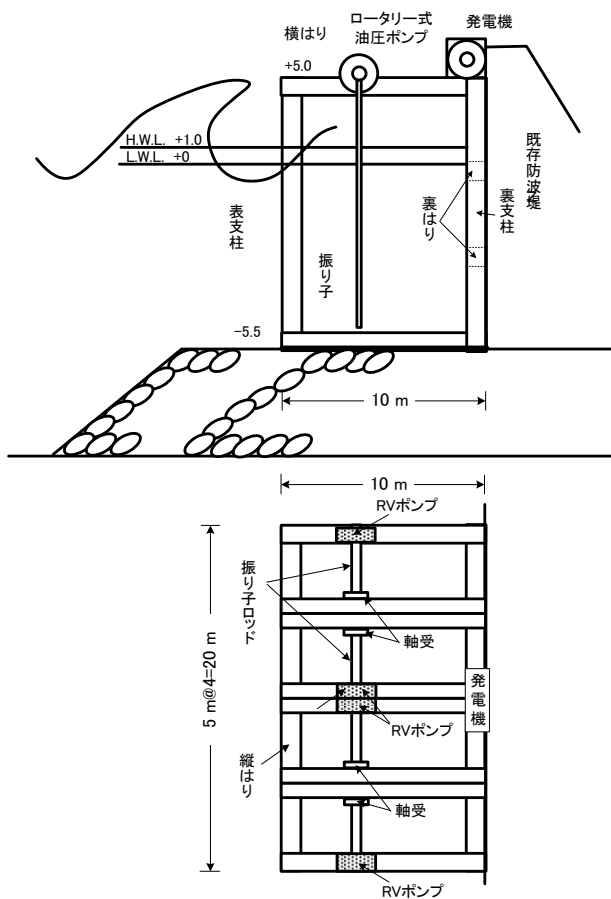


図-4 鋼製フレームを用いた設計例の概略図

側壁部、底板部および背後部には、中間支柱およびはりで補強している。また、波のエネルギーが振り子に効率よく変換されるように、側壁と底板に鋼板をはり、水の移動を防いでいる。各フレーム、支柱およびはりには、200×200mmのH型鋼を用いた。

付加型鋼製フレームの開口ケーソンは自重を小さくできるが、転倒および滑動に対する安定限界波高は鉄筋コンクリート製の開口ケーソンより大きくなる。

(2) 鉄筋コンクリート開口ケーソン(B型)

図-2に示す鉄筋コンクリートケーソンは3室 (N=3) である。室蘭港に設置された開口ケーソンは2室である。図-4のA型と同じ全長20m、4水室の場合について、 $d_{sw}=d_{bw}=d_{ow}=0.5m$ 、 $d_{pw}=0.4m$ 、 $C_w=4.45m$ となる。

3. 発電コストの試算

3.1 対象構造物と設計条件

日本海側の本土の港を対象に、定格450kWの波力発電施設を設置する。離島の場合については、近藤ら⁵⁾によって推定されている。設計波は表-1に示すように機械設備の耐用年数に合わせて、開口ケーソンも15年再現波を採用している。

取得電力は既存の電力網に投入することを想定する。表-2は機械システム（振り子板、油圧変換機、発電機）

表-1 設計波

水深	L.W.L 下 10 m
設計潮位	+1.0 m
平均波パワー	10 (kW/m)
再現期間 15 年設計波	$H'_0 = 6m, T_{1/3} = 12sec.$

表-2 機械設計条件

ケーソン寸法	長さ 20m, 幅員 10m
一基当たりの平均入力波パワー	10×20 = 200 kW
総合効率	0.45
定格出力	200×0.45 = 90 kW

の設計条件である。総合効率は表-2に示した0.45を採っている。

ケーソンの1ユニットの長さを20mとし、5ユニット、全長100mである。以下のコスト計算は1ユニット当りにしてある。

3.2 発電コスト

波力電力の建設コスト (円/kW) や 発電コスト (円/kWh) は水力発電に準じて推定される。ここでは寒地港湾技術研究センターが用いた波力発電コスト C_G (円/kWh) の推定方法⁶⁾に準じて試算する。

$$C_G = \frac{\{ \text{年間固定費} + \text{年間運転費} \} (\text{円})}{\text{年間発電量 (kWh)}} \quad (11)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{年間発電量} \\ \text{(kWh/年)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 8760 \\ \text{(hr/年)} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{定格出力} \\ \text{(kW)} \end{array} \right] \times \text{年間稼働率} \quad (12)$$

表-3 建設費・年間固定費・運転費

型 式 費用(千円)	鋼製フレーム型	コンクリート型
A: 構造物建設費	33,000	90,000
B: 機械と電気設備	30,000	30,000
C: 建設費 計	63,000	120,000
D: 年間固定費 = C×均等化係数 (15 年稼働, 利率 2%, 固定資産税率 1.4%)	63,000×0.0861 = 5,420	(30,000) 20,000×0.0861 (2,580) = 10,330
E: 運転費	B×0.05 =30,000×0.05 = 1,500	1,500
F: 年間経費	D + E = 6,920	(4,080) 11,830

註：() の数値はコンクリート型で「構造物建設費」を除いたもの。

振り子式システムの稼働率は、室蘭工業大学テストプラントでの現地試験^{1),7)}をもとに、次のように推定する。本システムの特徴の一つとして、他種に比べて小さな波高で運動が始まり、カットイン有義波高は 0.3m である。カットオフ波高は、振り子板の許容振れ角から定められるものであり、カットオフ有義波高は 4m とする。有義波高 0.3 から 4m の出現確率は、高橋ら⁸⁾によれば、日本海の酒田沖で 85%、太平洋の鹿島沖では 95%であり、これを可能稼働率とする。ここでは日本海を対象とし、点検修理などによる運転休止率を可能稼働率の約 25%として、稼働率を $0.85 \times 0.75 = 0.6$ とした。したがって、年間発電量 G は下式による。

$$G = \text{定格} \times \text{稼働率} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \\ = 90 \times 0.6 \times 365 \times 24 = 473,000 \text{ kWh}$$

表-3 の年間経費 F を用いると、発電単価 = F / G は、

A) 鋼製フレーム型	15 (円/kWh)
B) コンクリート型	25 (円/kWh)
C) B) でケーソン建設費を除いた	9 (円/kWh)

これより発電コストは、開口ケーソンが鉄筋コンクリート製に比べて鋼枠製では約 40% 安価になり、15 (円/kWh) となった。コンクリートケーソンの場合でも既設防波堤の補強として、建設費が免除されるなら、9 (円/kWh) にまで低下する。

また、コストを発電コストに環境コスト、社会的コストを加えたトータルコスト⁹⁾で考えると、火力発電のコストよりも安くなる。

4. 本提案の応用

波力発電の利用は、世界のいくつかの海や海岸で現在実現しているが、沖合風力発電に比べて非常に遅れている。その主要な理由は、他種のエネルギーとの価格競争にある。

表-4 に波力発電の設置場所による入射パワー、用途の比較を示している。

表-4 設置場所と入射パワー、用途

防波堤の設置場所	入射パワー	用途
直線的な海岸	低い	ロカルな照明、熱
半島、岬の海岸	高い	熱 ローカルな電気
離島の海岸	より高い	島の全エネルギー

離島の沿岸における平均波パワーは、同じ沖合波パワーを持っている本土の直線の海岸より比較的高い。その理由は、前者は後者より広い角度を持つ入射波を受けるからである。また、半島においては、屈折の影響のため波パワーは直線海岸より幾分高い。

離島では、ほとんどを石油ディーゼル発電に依存しており、より遠いところから少量の石油を輸送するため、石油価格は本土に比べて非常に高い。また、離島ではエネルギーは取得されたその近くで消費されるので、エネルギーの輸送コストは安くなる。よって、離島は波パワーの利用の面でも有利である。

5. むすび

- (1) 式(8), (10)の結果から滑動安定限界波高は、既設の防波堤と比べ約 2 倍増加する。
- (2) 本提案による建設費は、開口ケーソン単独方式の建設費より安価であるので、発電コストは相当に安くなる。開口ケーソンを鉄筋コンクリート製でなく鋼枠製にすると、発電コストはさらに低下する。
- (3) 本土の日本海海岸にある港における発電コストを試算した結果、本提案は風力発電に対抗できるケースがあることが明らかになった。
- (4) 離島では石油ディーゼル発電に依存しているため、発電単価は非常に高価になっている。一方、本土よりもより強い入射パワーを常に受けており、本提案は非常に有効である。

謝辞：振り子式の機械システムに関して、懇切にご指導頂いた渡部富治博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) 渡部富治, 近藤俊郎: 波力発電, パワー社, 147p., 2005.
- 2) T.Watabe, Utilization of the Ocean Wave Energy, T-Wave Consulting Volunteer, 151p., 2008.
- 3) 浦島三朗, 近藤俊郎, 谷野賢二, 長内戦治: 波力発電用開口ケーソンの安定性に関する検証, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 716-720, 2005.
- 4) 古澤彰範, 近藤俊郎, 藤間聡, 長谷川覚也: 浮上形振り子式波浪発電システムの研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1166-1170, 1994.
- 5) 近藤俊郎, 浦島三朗, 川森晃, 綿貫啓: 離島の既設防波堤を利用する低コスト波力発電の提案, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 369-374, 2010.
- 6) H.Kondo, F.Taniguchi, S.Osanai and T.Watabe, Cost analysis of the wave power extraction at breakwaters, Proc of 12th ISOPE, ISOPE, pp.614-618., 2002.
- 7) 近藤俊郎, 谷口史一, 渡部富治, 浜田和哉: 新型振り子式波浪発電の現地性能試験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1261-1265, 1999.
- 8) 高橋重雄, 安達崇: 日本海周辺における波パワーの特性と波力発電, 港湾技術研究資料, No. 659, 港湾技術研究所, 18p., 1989.
- 9) H.Kondo, I.Sugioka and S.Osanai, The concept of true cost of energy and its application to ocean energies, Proc. of International Symp. on Ocean Energy Development, Muroran Inst.Tech and Cold Region Port & Harbor Research Center, pp.101-106., 1993.