

2. 波力発電システムの概要

水弁集約式波力発電システムは、防波堤に組み込んだ波力空気室で、波の上下運動（寄せ波、引き波）を往復空気流に換え、機械的な弁を用いずに水弁を用いて往復空気流の整流・集約化を図り、タービンを回転させて発電するものであり、波力発電としては単機出力（定格出力130 kW、波高3m、周期8秒、発電効率15%での設定値）で国内最大の設備規模である。（図-2、3参照）本システムは以下の特徴を有している。

- ①機械的な可動部が少ないので、信頼性が高く維持管理が容易である。
- ②波エネルギーを効果的に集約できるので、大規模発電が可能である。
- ③波高の大小にかかわらず、波エネルギーを有効に利用できる。
- ④波のエネルギーから、平滑された発電出力を得ることができる。等

3. 波力ケーソンの設計

（1）台形ケーソン上部斜面堤

波力ケーソンの外観形状は原町火力専用港防波堤に採用された「台形ケーソン上部斜面堤」（図-4）の形状を基本とした。この形状は当社で開発したもので、耐波安定性が高く経済的な形状となっている。当ケーソンの開発経緯、詳細設計については、既発表文献に譲ることとし、この項では基本形状の概要と形状効果及び経済性について記載する。

a. 基本形状の概要

台形ケーソンは、型枠の製作・取外しおよび足場・支保工の構造上、斜面部の製作工事費が増となるものの、堤体断面積を減少させることができるため工事費低減に有利である。合田式の波圧分布から、海水面付近で傾斜角度を大きくすることが波力の有効活用（鉛直成分波力を増大させる）には効果が大きい。ケーソン自体に2段の傾斜を設けることは、施工が複雑化し工事費の増につながることから、ケーソン本体と上部コンクリート部とで傾斜角度を変えることとし、傾斜角度をパラメーターとした数タイプで経済性を検討した結果、図-4に示す形状となった。

また、水深に応じた防波堤構造を比較検討した結果、水深10m～14mでは矩形ケーソン、水深14m以上では台形ケーソン上部斜面堤を設置することとした。これにより、ケーソン堤総延長約2.3 km（総函数99函）のうち、矩形ケーソンが延長約0.6 km（26函）、新型ケーソンが延長約1.7 km（73函）となった。なお、台形ケーソン上部斜面堤の水利機能、堤体の安定性については、小縮尺（ $S=1/50$ ）および実証レベルに近い大縮尺（ $S=1/10$ ）による水理模型実験を行い確認している。

b. 形状効果および経済性

①耐波安定性に対する最適化

当ケーソンは、下幅で端趾圧の調整、上幅で滑動安全率の調整ができるため、滑動の安全率および端趾圧を最適にすることができ、無駄のないバランスのとれた形状が可能になる。

②鉛直成分波力の利用による堤体重量の低減

台形ケーソンおよび上部斜面部に作用する波力の鉛直成分を堤体の安定性に利用することができる。設計波高が高いほど、堤体の安定性に利用できる鉛直成分波力が増大するため、矩形ケーソン堤に対する堤体重量の低減率が増加する。今回開発したケーソン堤では、堤体重量を約15%低減することが可能になった。

③水平波力の低減

傾斜角 45° の上部コンクリート部は水平波力を低減させる機能を持つ。水理模型実験でも確認されたが、上部コンクリート部に作用する水平波力を50%にすることができ、全水平波力は約11%低減できた。

④工事費の低減

この形状効果により矩形ケーソンと同等の耐波性能で防波堤断面を減少させることができるため、ケーソン本体のコンクリート量で約17%、中詰砕石量で約15%の低減などにより、ケーソン堤工事費は約9%、約33億円の低減が可能となった。

⑤製作函数の減少と工期の短縮

当ケーソンの導入により、1函当りの堤体重量が減となるため、ケーソンの進水能力（最大3,600 t）を変更することなしに、1函当りの延長を長くすることができ、全体函数を当初計画数125函から99函に減ずることができた。また、函数

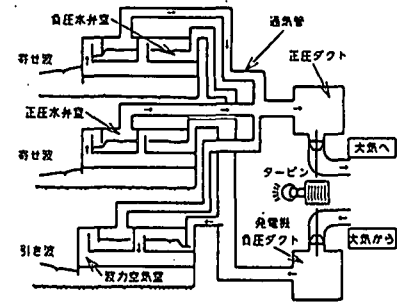


図-2 波力発電システム図

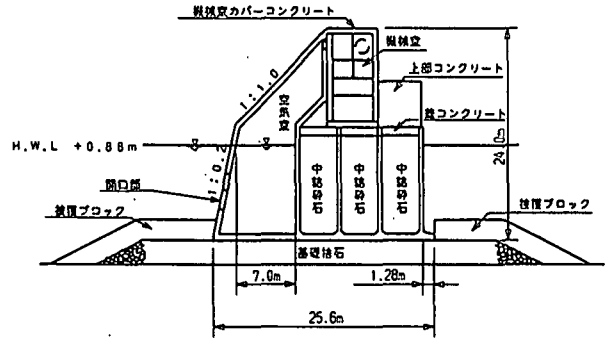


図-3 波力ケーソン標準断面図

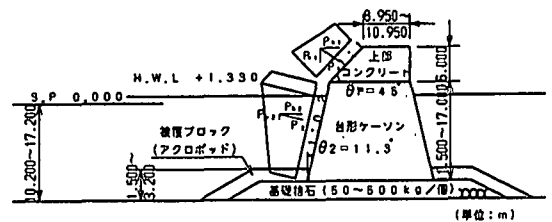


図-4 台形ケーソン上部斜面堤

を減じたため、ケーソン製作および据付工程とも4ヶ月の工期短縮が可能となった。

(2) 波力ケーソンの基本形状

表-1 波力ケーソンの形式比較

波力ケーソンの外観形状は台形ケーソン上部斜面堤（以下「通常ケーソン」という。）の形状を基本としているが、その規模は、定格出力（130kW）の発電に必要な空気流が得られる大きさの偶数の空気室を確保し、かつ堤体の安定条件を満たすように設定した。その結果、空気室数を4室とし、奥行きを発電効率の模型実験から基準海面（M. W. L. +0.88m）で7m、ケーソン高さは水弁室と機械室の設備条件から2.4mとした。

	単 独 函 (2 函)	長 大 函 (1 函)
概念図		
概 要	ケーソンを空気ダクトで結ぶ。	両脇の通常函を含め一体化させ、重量の分散を図り、ケーソンを製作
長 所	①製作：通常ケーソンの設計手法を利用 ②据付：連続日数（ $H_{1/3} < 1\text{m}$ ）3日 継続で据付可能、月3回稼働可能	①海上施工が少ない。発電プラント部の施工が容易 ②ケーソン函のジョイントが必要無い。
短 所	①ケーソン間の不等沈下対策が必要 〔重錘によるマウンドの締固め、空気室ダクトの接続にフレキシブルジョイントの採用により対策可能〕 ②発電プラント機器の海上据付が必要	①長大によるねじれ等未解明の力の発生が懸念される。（函にひび割れが発生した例がある。） ②据付～中詰には6日以上静穏（ $H_{1/3} < 0.5\text{m}$ ）を必要とする。〔原町出現頻度は0.1回/月以下で工程確保が困難〕
工事費	100	105～150
評 価	○	△

また、通常ケーソンと異なり、端し圧を抑えるため、港内側に1.28mのフーチングを設けた。

なお、波力ケーソンの型式決定に当っては、表-1に示す通り単独函（2函）と長大函（1函）の比較を行い、主に経済性の観点から単独函を採用した。

a. 設置位置

波力ケーソンは、次の理由により南防波堤先端部より2函目および3函目とした。

- ①北防波堤に比較し、陸上観測所との距離が短く、運転管理を行いやすい。
- ②防波堤工事への影響を小さくするため防波堤先端部付近が好ましい。

なお、波力ケーソンは通常ケーソンよりも約6m幅が広く、通常函よりはみ出すことになるが、これについては、波の影響を考え、ケーソン港外側を通常ケーソンと合わせることとした。（図-5参照）

b. 構造

水弁室と機械室は鋼板で構成されたユニットとし、波力ケーソン据付後に海上で搭載してコンクリートで巻き立てた。ケーソン外形は、通常ケーソンよりも天端が高く、波を受けやすくなるが、開口部が消波型ケーソンの役割を果たすため、設計最大波に対する水平波力は通常ケーソンより16%程度小さくなる。（表-2参照）

c. 形状

- ①ケーソン幅：空気室奥行き寸法を踏まえ、堤体の安定条件を満たすように設定した。
- ②ケーソン延長：空気室の数は偶数が好ましいことから、延長方向のマス数を通常ケーソンより1マス減じた4マスとし、マス幅を4.8mとし、ケーソン1函当りの延長は20.85mとした。
- ③ケーソン函数：波力発電定格出力を得るために、延長20.85mのケーソンを2函とした。
- ④空気室奥行き寸法：発電効率の模型実験結果から設定周期に対する波長の約10%とした。ここでは、周期8秒として奥行き寸法を7m（基準海面M. W. L. +0.88mにおける値）とした。
- ⑤空気室前面壁没水水深（開口部上端）：L. W. L. 以下に最大波高の25%の深さとした。
 $H_{max} \times 11.2\text{m} \times 0.25 = 2.80\text{m}$ L. W. L. $0.23\text{m} - 2.80\text{m} = -2.40\text{m}$
- ⑥空気室開口部下端：開口部下端は、基礎マウンド被覆ブロック上端レベルに合わせた。
- ⑦上部コンクリート天端高：ケーソンの安定に必要な高さとした。なお、堤頭函への点検通路としては、波力ケーソン内の歩行通行を可能とすることで対応した。

(3) 堤体の安定検討

堤体の安定性については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づき検討した。

a. 設計条件

- ①潮 位 H. W. L. = S. P. +1.33m L. W. L. = S. P. +0.43m (S. P. = T. M. S. L. -0.86m)

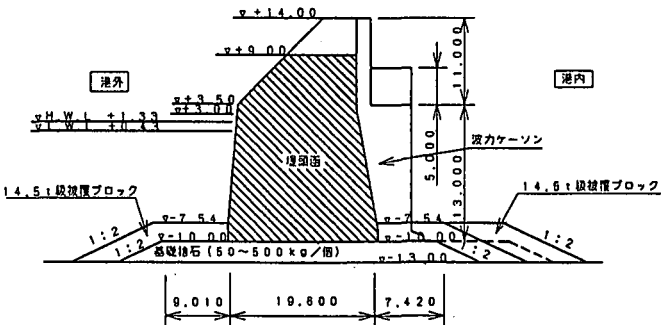


図-5 波力ケーソンと通常ケーソンのすりつけ

表-2 水平波力算定結果

	H. W. L.	L. W. L.
波力ケーソン	166.39(t/m)	154.88(t/m)
通常ケーソン	191.57(t/m)	189.25(t/m)

②設計波 表-3に設計波の諸元を示す。

b. 波力算定式

波力ケーソンは、開口部が消波型ケーソンの役割を果たすため、図-6の拡張された合田式を用いた。なお、ケーソンに作用する波力の算定は、図-7に示す2つの範囲に分けて算定した。

上部斜面部に作用する波力は、水平成分波力と鉛直成分波力に分割し、下部ケーソン部に作用する波力は、前壁斜部に開口部を有することから、波力の鉛直成分は考慮しない直立壁として算定した。

(4) 水理模型実験

波力ケーソンの設計波力および発電性能を把握するために水理模型実験を実施した。

a. 実験内容

①外力試験 (縮尺: 1/100)

ケーソンに作用する水平波力・鉛直波力・モーメントおよびケーソン前面壁に作用する波圧を求めた。

②性能実験 (縮尺: 1/25)

空気室内の水位および水弁室差圧を求めた。

b. 実験結果 (外力試験)

実験で求められる波力は、図-8および図-9のとおり、計算値に対し80~97%となり、前述の波力算定式により計算することの妥当性が確認できた。

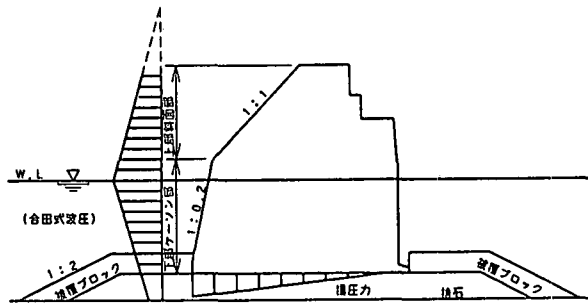


図-7 波力算定時の範囲分け

表-3 安定検討に用いる設計波

	H. W. L.	L. W. L.
有義波高	7.30m	7.30m
設計波高	11.20m	10.50m
周期	16sec	
波長	181.1m	175.5m
波向	SE (β=18.5°)	

$$q^* = 0.73(1 + \cos \beta) A_1 H_{max}$$

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \lambda_1 \alpha \cos^2 \beta) A_1 \omega_0 H_{max}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cos(2\pi h/L)}$$

$$P_3 = \alpha_2 P_1$$

$$P_4 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_1 \alpha_2 \omega_0 H_{max}$$

ここに

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sin(4\pi h/L)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h - d}{3hb} \left(\frac{H_{max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{max}} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h}{k} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

- q^* : 斜面上波圧係数が0となる高さ
- P_1 : 斜面上における波圧係数
- P_2 : 前壁面における波圧係数
- P_3 : ケーソン下部における波圧係数
- P_4 : 前壁面波圧係数
- h : ケーソン前面壁における前壁面水深
- hb : ケーソン前面壁から岸側に有義波高の5倍だけ離れた点での水深
- h' : ケーソン後面水深
- d : 基礎の工またはマウンド設置工ともかきいけうの水深
- ω_0 : 海水の単位体積重量
- H_{max} : 設計計算に用いる有義波高
- L : 波型hにおける設計計算に用いる波長
- β : 前壁面法線の方位と、波の来方向から±15°の範囲で最も危険な方向となす角度
- λ_1, λ_2 : ケーソンの構造等による波圧の修正係数
波力ケーソンでは、 $\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0.0$

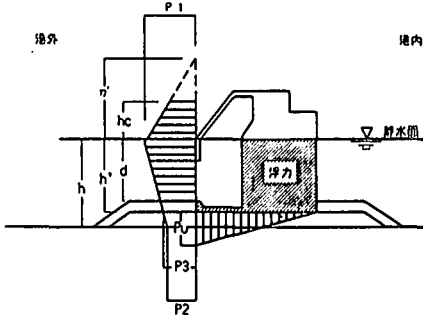


図-6 波力ケーソンの設計波力算定式

(5) 部材設計

空気室は開口部を有する複雑な構造となるため、FEMにより解析を行った。後部ケーソンの構造解析は、通常ケーソンと同じ「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示される版の図表により行い、設計荷重は通常ケーソンと同様にした。

また、コンクリートは開口部の圧縮応力度から $f_{ck} = 300 \text{ kgf/cm}^2$ (通常ケーソンは 240 kgf/cm^2) とし、種別は通常ケーソンと同様にフライアッシュセメント (B種) を使用した。

4. 波力ケーソンの施工

(1) ケーソン製作

波力ケーソンの製作に当っては、まず通常ケーソンの製作に影響を与えることが懸念されたことから、表-4に示すとおり、フローティングドック製作案 (CASE1) と陸上製作+海上打継案 (CASE2) の比較により検討した結果、工程上、経済性の点でCASE2を採用することとした。海上打継は、波力ケーソンの総重量 (4,830t) がシンクロリフトの進水能力 (3,600t) を超えるため、陸上製作と海上製作に分けて製作する必要があったことによるものである。

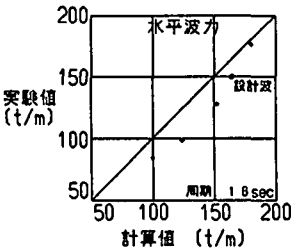


図-8 水平波力の実験値と計算値の比較

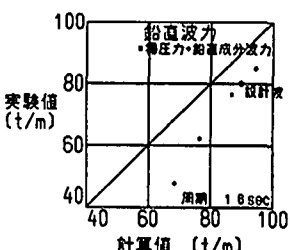


図-9 鉛直波力の実験値と計算値の比較

a. 陸上製作

ケーソン函台上では、高さ13m（重量3,500t）を5層に分割して製作し、波を取り入れる開口部にはH型鋼、鋼板による止水蓋を取り付けた。（図-10参照）また、ケーソンマスのうち港外側については、据付時の中詰材が充填しにくいので隔壁の一部に開口部を設けた。

延長が同じである通常ケーソン（N5タイプ）と波力ケーソンの製作日数を比較すると、通常ケーソンは平均65日、波力ケーソン2函の平均は93日であったが、これは両函のコンクリート量（1,377m³：1,783m³）、鉄筋量（155t：250t）の違いからくるものであり、陸上製作の困難さにおいては、波力ケーソンと通常ケーソンの相違はほとんど無かったものと言える。

b. 海上製作

海上打継場では、高さ11mの斜面部を4層に分割して製作した。製作日数は2函とも各約120日を要している。（図-10参照）空気室上部斜面部のコンクリート打設は締め固めの不十分や材料分離が懸念されたことから、型枠にRCクロス（透水シートと排水ネットの二重構造）を貼り付け、ブリージング水と気泡の排出を促進させた。空気室斜面部は、密閉に近い状態となることから、解体材料の搬出のために機械室前面壁に仮開口部を設け、支保工材料の搬出後、ステンレス鋼板を用いた型枠で仮開口部を閉塞した。

(2) 基礎マウンドの構築

基礎マウンド被覆ブロックは、波力ケーソンが堤頭付近であるため、港内側についても港外側と同様のアクロポッド（R）14.5tを設置した。基礎マウンドは、通常ケーソンがブレードによる均しのみであるのに対して、波力ケーソン間の不等沈下を防止するため、2層に分けて27.6tのコンクリート重錘を用いて締め固めた。

（図-11にアクロポッドを示すが、これはフランスソグレア社の製品であり、1層積みでも十分な安定性があり、従来型に比較して、コンクリート量を削減できること、1個当りの重量が小さくできることから施工能率・使用機械の小型化が図られること等、工事費の合理化に多大に寄与している。）

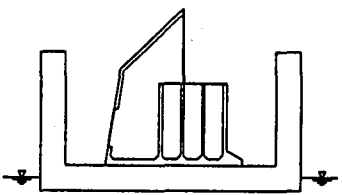
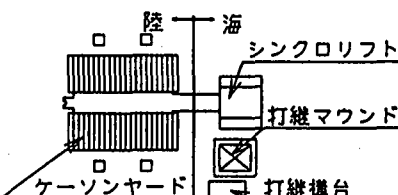
(3) 摩擦増大マットの施工

ケーソン堤には摩擦増大マットを施工したが、波力ケーソンには生ゴムマット、矩形および通常ケーソンはアスファルトマット（一部は再生ゴムマット）を使用した。これは、波力ケーソンが海上打継ぎをするため仮置き回数が1回多いこと、また海上仮置きマウンド上に約7ヶ月と比較的長く存置されることから、塑性的なアスファルトマットよりも弾性的な挙動を示す生ゴムマットを採用したものである。

(4) ケーソン間の処理

今回の波力発電システムは、ケーソン2函を併設して空気流を集約するが、このケーソンを結ぶ空気ダクトはゴム製のフレキシブルジョイントで結合することとした。ジョイントの許容変位量は据付後の変位を考慮して20cmとした。

表-4 波力ケーソンの製作比較

	CASE 1	CASE 2
	フローティングドック	陸上製作+海上打継
概念図		
概要	最寄りの港で製作し、原町まで曳航	ケーソン重量がシンクロリフトの進水能力（3600t）を越えることから、陸上と海上に分けて製作
長所	原町のケーソン製作工程に影響を与えない。	既存のケーソンヤードを利用できる。
短所	フローティングドック損料が高い。	①海上打継ヤードを確保する必要有り →進水設備近くにマウンド、作業構台を設置して対処する。 ②原町ケーソン工程への影響 →その他のケーソンの工程短縮等影響回避措置により対処する。
工事費	100	95
評価	△	○

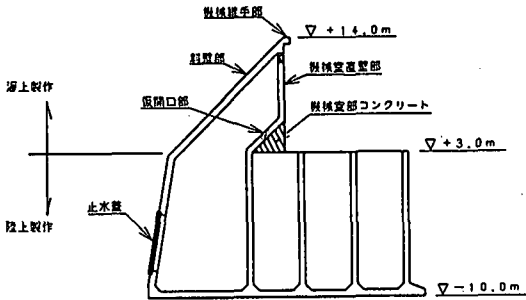


図-10 陸上・海上製作断面

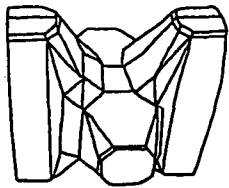


図-11 アクロポッド

(5) ケーソン据付

a. 据付工程の設定

波力ケーソンの据付工程の設定に当っては、波力ケーソンが、通常ケーソンに比較して据付用ワイヤーがとりずらい、重心が高い、重量が大きい、高さがあり風の影響を受けやすいなど据付に非常に困難を伴うことを考慮して、年間を通じて最も静穏な時期（12月）を設定した。

b. 据付に採用した新技術

波力ケーソンも含めたケーソンの据付に当っては、次の新技術を採用し、工事管理に威力を発揮した。

①波浪予測について、これまでの有義波法に代わるスペクトル法による波浪予測システムを開発・導入し、7日間の予測を実施している。

②据付作業では、精度1～2cmのGPS（グローバルポジショニングシステム）によりリアルタイムでパソコン画面で確認しながらケーソンの位置決めを行っている。ケーソン工事にGPSを利用するのは当地点が国内初である。

c. 据付許容範囲の設定と据付実績

①法線に対する出入の制約条件

- ・基礎マウンド本均し幅は、ケーソン幅+1mとしているので、据付精度は±1m以下とする。
- ・防波堤上部工天端幅（8.95m）の最小値8mを確保する必要から、隣接したケーソンとの法線直角方向のずれ間隔を47cm以下とする。
- ・法線直角方向側壁に波力を直接作用させないために、隣接ケーソンとの間隔を法線平行方向側壁厚の45cm以下とする。

②据付目地間隔の制約条件

- ・基礎マウンド捨石サイズはΦ300～600であることから、局所的な石材の流出を防止するため、目地間隔は30cm以下とする。
- ・据付目地間隔は、設計上15cmをあらかじめ施工性を考慮して設定している。

③据付出来形許容範囲の設定および据付実績

以上より、表-5および図-12に示すとおり、ケーソンの据付許容値を設定した。

同表の実績値からみると、波力ケーソンの場合、波浪条件の良い時期を設定しているにもかかわらず、据付精度は通常ケーソン等に比較すると劣っている。これは、ケーソン幅が大きいという影響もあるが、重心が高く風の影響を受けやすくなっている等構造上の問題によるものと考えられる。

表-5 ケーソンの据付許容値と実績値

ケーソン	法線の出入り (許容範囲：±70cm)				隣接ケーソンとの間隔 (許容範囲：30cm以下)				天端高さ SP+3.00m 余盛10cm マット8cm				波浪状況 (平均)
	測定位置	設計値 (cm)	実測値 (cm)	差 (cm)	測定位置	設計値 (cm)	実測値 (cm)	差 (cm)	測定位置	設計値 (m)	実測値 (m)	差 (cm)	
波力ケーソン	a	0	-10	-10	c	15	22	+7	イ	3.18	3.27	+9	$H_{1/3}=0.4\text{m}$ $T_{1/3}=3.2\text{sec}$
									ロ	3.18	3.16	-2	
	b	0	-11	-11	d	15	17	+2	ハ	3.18	3.25	+7	
									ニ	3.18	3.15	-3	
通常ケーソン	a	0	+3	+3	c	15	12	-3					$H_{1/3}=0.6\text{m}$ $T_{1/3}=7.0\text{sec}$
	b	0	-1	-1	d	15	12	-3					

* 1) 実測値：波力ケーソンは2箇の平均、通常ケーソンは通常ケーソンと矩形ケーソン94箇の平均値

* 2) 法線の出入りの許容範囲：隣接ケーソンとの法線直角方向のずれ間隔は45cm以下

5. おわりに

波力ケーソンについては、波力発電システムを原町火力に設置すると決定した後、ケーソン設計、製作・据付施工計画、工程調整等各段階で種々の検討が加えられ、難工事も予想されたが、予定通り平成6年8月製作開始、8年4月に無事プラントまでの据付を完了した。この後、8年9月より波力発電システムの実証試験を開始し、11年3月まで継続する予定である。なお、今回当地点で採用した新型ケーソンについて、実海域における安全性および設計の妥当性を検証するため2箇所で波圧測定を行っており、その結果は今後の新型ケーソンの設計に十分反映できるものと思われる。

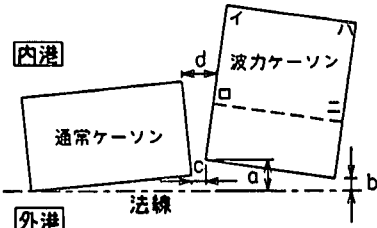


図-12 ケーソン据付許容値設定図

参考文献

1) 渡辺國也、中川寛之；水弁集約式波力発電装置に関する研究、電気学会論文誌109-B巻第5号、1989
2) 奥野、村野、阿部、北松；原町火力防波堤における台形ケーソン上部斜面堤の開発について、電力土木No. 251、電力土木技術協会、1994. 5
3) 遠藤、佐々木、大高；原町火力発電所波力発電用ケーソンの設計と施工、電力土木No. 260、電力土木技術協会、1995. 11
4) 佐々木、大高；原町火力発電所波力発電用ケーソンの設計と施工、土木学会第51回年次学術講演会、土木学会、1996. 9