

波力発電ケーソンに働く波力について

運輸省第三港湾建設局 正会員 小島朗史

運輸省港湾技術研究所 正会員 高橋重雄

1. まえがき

波力発電ケーソンは、波エネルギーを電気等の他のエネルギーに変換する機能を持つ特殊なケーソンであり、防波堤や護岸¹⁾に用いられる。写真-1は波力発電ケーソン防波堤の完成予想図を示すものである。写真のようにこのケーソンは通常のケーソンの前部に空気室と呼ぶ特別な室を持ち、ここで波のエネルギーを空気のエネルギーに変換し、空気のエネルギーでタービン・発電機を回転させる。空気室で波のエネルギーを吸収するため、反射波は小さく、また越波は小さい。すなわち、このケーソンは消波ケーソンと考えることもできる。波力発電ケーソン防波堤は当然、台風時などの厳しい波に対しても安定でなければならない。波力発電ケーソンの耐波安定性について模型実験を行い、実験結果に基づき耐波設計法を提案した。ここでは、その実験結果と耐波設計法を示すとともに、試設計例を示す。

2. 実験方法と結果

(1) 実験方法

実験は港湾技術研究所の105m造波水路で行った。実験波は規則波であり、波の周期は2.85、3.80、4.74秒の3種類、波高は非碎波から碎波まで変化させている。模型設置位置での水深は85cmと100cmの2種類であり、海底勾配は1/100である。

図-1は測定に用いた模型を示すものであり、図-2は波圧計の設置位置を示すものである。模型は3種類あり、

- (a) $\epsilon = 1/100$ とした通常のノズル開口率の場合、
- (b) $\epsilon = 0$ としたノズルが閉じられた場合、
- (c) $\epsilon = 1/3$ とした空気室天井が大きく開かれた場合、

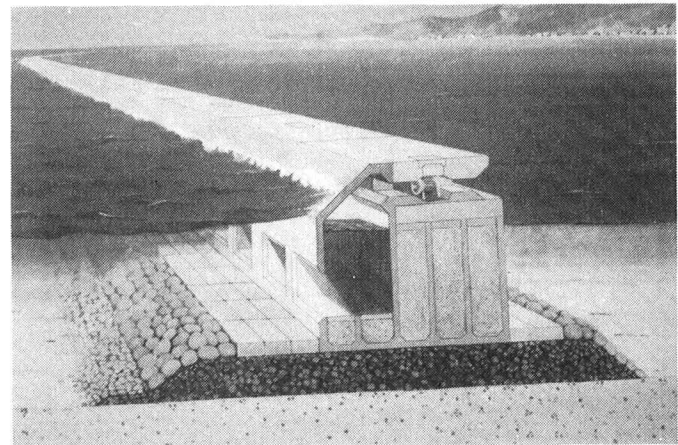


写真-1 波力発電ケーソン防波堤

(財) 沿岸開発技術研究センター 提供

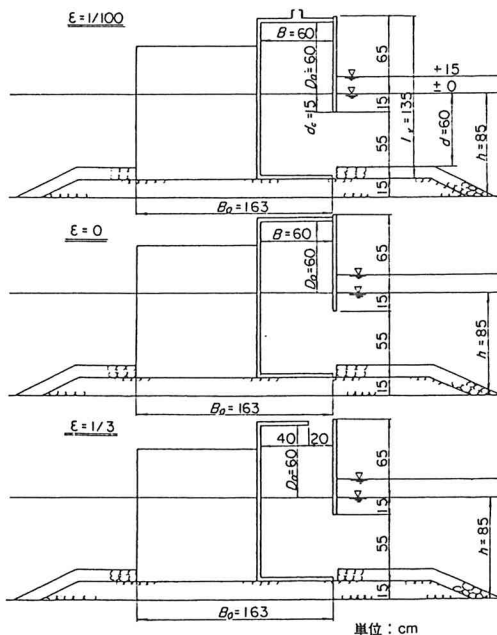


図-1 波圧測定模型

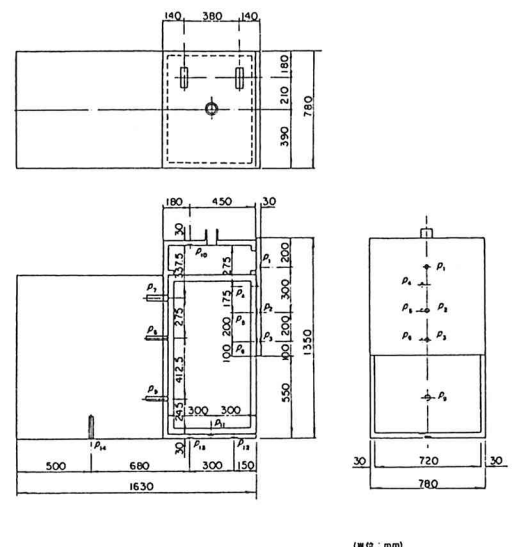


図-2 波圧測定位置

がある。このうち、(b) は波高が大きくタービンの開口部から海水が侵入する危険性があり、開口部を閉じた場合に相当する。また、(c) は過大な空気圧がタービンや空気室の天井壁に作用しないようノズルの開口率を大きくとった場合に対応する。以下に実験結果を述べる。

(2) 波圧波形の特徴と同時波圧分布

図-3 は $\epsilon = 1/100$ の場合の波圧波形の例である。 p_2 は前壁（カーテンウォール前面） p_5 は前壁後面、 p_8 は後壁 p_{10} は天井下面、 p_{11} は底板上面、 p_{12} は底板下面のそれぞれほぼ中央の波圧であり、鉛直方向のものは鉛直上向きを正、水平方向のものは波の進行方向を正とした。 F_H は各壁面の波圧から求めた水平合力、 F_V は鉛直合力である。

図-3 から次のようなことがわかる。すなわち、前壁前面での水位が上昇するにつれて空気室の空気が圧縮され、空気室天井のみならずその圧力が空気室全体に働く。空気室内では圧力よりほぼ90度位相²⁾が遅れて水位が上昇し、この水圧による圧力が空気圧に加わる。 p_8 では t がほぼ0.4 秒の時に、 p_5 では t がほぼ0.8 秒の時に水位が波圧計の位置まで達しているのがわかる。この条件では波高が大きいため、 t が2.0 秒付近で前面の水位が前壁下端より下がってしまい、空気室中の空気が大気に解放される。

図-4 は $\epsilon = 0$ の場合の例であり、すべての壁面に空気の圧縮振動による周期0.3 秒程度の波圧波形が現れているのが特徴である。波高が大きい場合には前壁前面の水位は前壁の下端以下に下がり、再び空気を閉じ込める時に空気の圧縮振動による圧力を発生する。この圧力が水位変動による圧力に重ね合わさっている。この圧力については、谷本・高橋・村永²⁾によって研究されており、その算定法も一応導かれている。現地におけるこの圧力は、模型実験結果をフルードの相似則によって現地量に換算した値より小さい圧力となるが、水位の変動による圧力よりかなり大きいと予想される。 $\epsilon = 1/100$ の場合にも、前壁の前面の水位はその下端より下がり、空気室の空気を大気に解放し再び空気を閉じ込めることがある。しかしながら、その時の波面の上昇速度が小さく、かつノズルからその圧力が解放されることにより、このような圧縮圧力は認められなかった。

図-5 は $\epsilon = 1/3$ の場合である。空気室が大きく大気に解放されているため、空気の圧力の影響が全くみあたらない。空気の圧力が作用していないため、前壁下部から侵入する波によって空気室内の水面の乱れは大きい。このため、 p_8 の後壁や p_5 の前壁後面の波形にみられるように、波面の一部が壁面に衝突するように作用して、立ち上がりの急な波圧波形となることがある。この条件では波高に比して空気室の天井が高く、天井壁面にはそれほど大きな波圧は作用していない。但し、波高が更に大きいあるいは天井が低い場合には、波面の衝突による大きい圧力が天井壁面に作用する危険性がある。

尚、 $\epsilon = 1/100$ の場合では、後壁中央での波圧 p_8 が最大となった時に空気室内の各壁面での圧力も最も大きく、また前壁前面での圧力も大きいと考えられる。この時は空気が圧縮されているときであり、空気室内にはほぼ同じ空気圧力が作用し、没水部分にはそれに波による圧力が加わっている。

(3) 各壁面に作用する波力

図-6 は、 $\epsilon = 1/100$ の場合の空気室後壁に作用する波力を示すものである。正の圧力を $p/w_0 H$ で表すとほぼ1.0 以下であり、負の圧力はほぼ0.5 以下である。この無次元値は1.0 や0.5 を越えることもあるが、それは波高が小さい時であり、波高が大きいほど値は小さくなる傾向にある。ここには図は示さないが、他の壁面に作用する波力もほぼ同様な傾向を示す。前壁（カーテンウォール）には前面と後面から圧力が作用するが、両者は互いに打ち消し合って、結果的にはそれほど大きな力は作用しないことも分かった。

図-7 は、 $\epsilon = 0$ の場合の後壁に作用する波力を示すものである。空気の圧縮振動による圧力のため $p/w_0 H$ で2.0 程度の圧力が作用することがわかる。すでに述べたように、現地での圧力は $p/w_0 H$ で表すとこれらの値より小さくなる。しかしながら、それでも $\epsilon = 1/100$ の場合より大きな値となる。なお、空気室内の各壁面にはこの図と同程度の波力が作用し、前壁前面には $p/w_0 H$ で1.0 程度の波力が作用する。

図-8 は $\epsilon = 1/3$ の場合の後壁に作用する波力を示す。後壁には $p/w_0 H$ で0.4 から1.0 程度の圧力が作用し、他の壁にも同程度の波力が働く。但し、実験条件の範囲では波高に比して空気室の天井がやや高く、天井壁下面に波面が衝撃的に作用

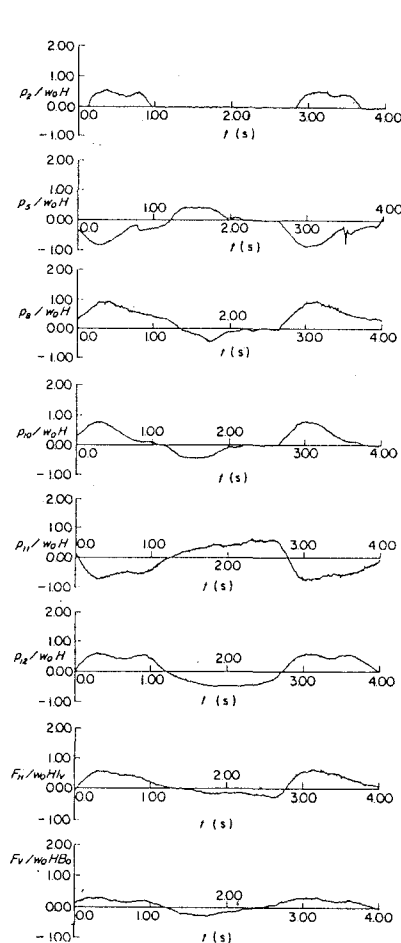


図-3 波圧波形($\epsilon = 1/100$)

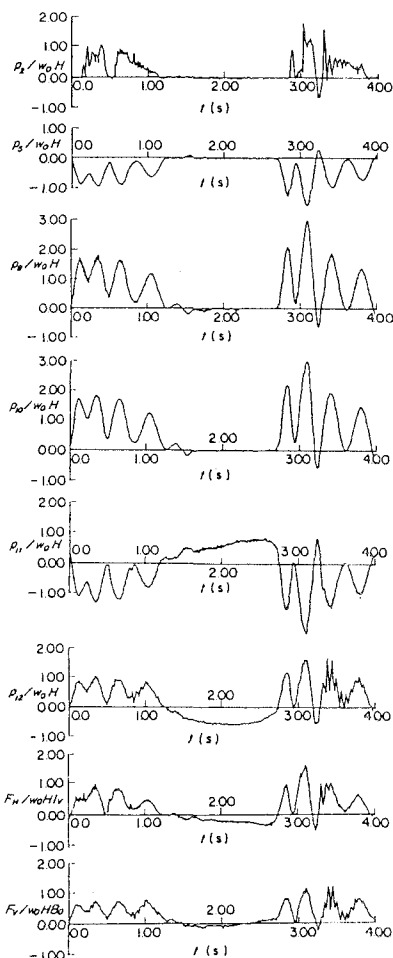


図-4 波圧波形($\epsilon = 0$)

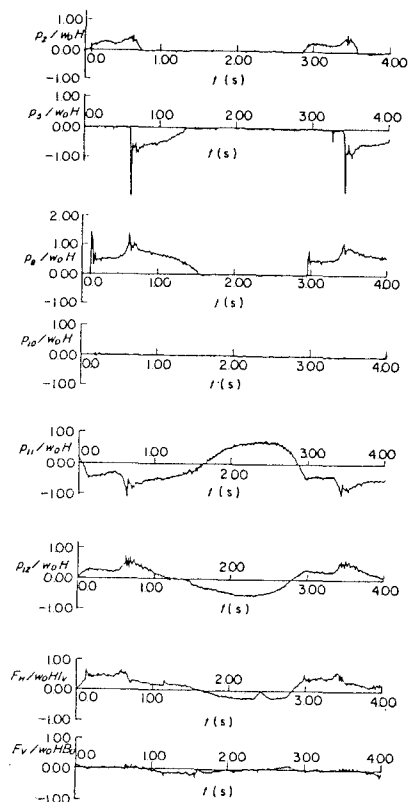


図-5 波圧波形($\epsilon = 1/3$)

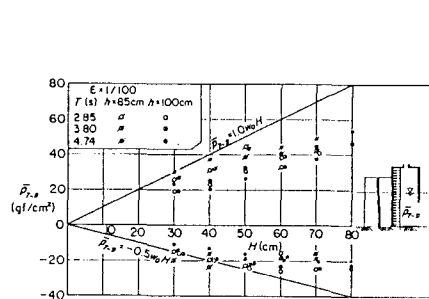


図-6 後壁に作用する波力($\epsilon = 1/100$)

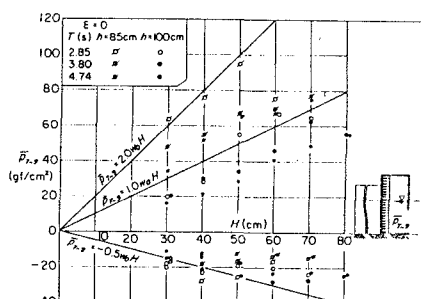


図-7 後壁に作用する波力($\epsilon = 0$)

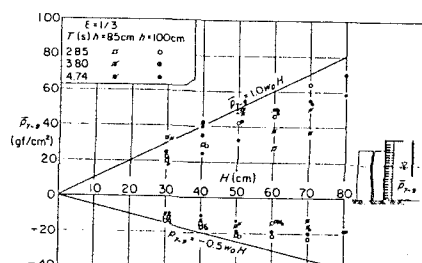


図-8 後壁に作用する波力($\epsilon = 1/3$)

することが無く、衝撃的な圧力が作用することが無かった。

(4) 水平および鉛直方向の波力合力

各壁面に作用する波力を水平方向成分と鉛直方向成分に分け、それぞれ加え合わせて水平合力と鉛直合力を求めた。水平合力についてはケーソンの全高で除して平均波圧を求め、鉛直合力についてはケーソン底面に作用するとしてかつ三角形分布で働くとして前端での波圧を求めた。図-9は $\epsilon = 1/100$ の場合の最大水平波圧とその時の鉛直波圧を示したものである。最大水平波圧は、波の条件によって異なるが $p/w_0 H$ で0.5 から1.0 の範囲に分布する。この時の鉛直波圧は $p_u/w_0 H$ で0.25から0.6 の間の値となる。これに対して、鉛直波圧が最大の時の水平波圧は $p/w_0 H$ で0.7 とやや小さくなり鉛直波圧は0.7 とやや大きくなる。

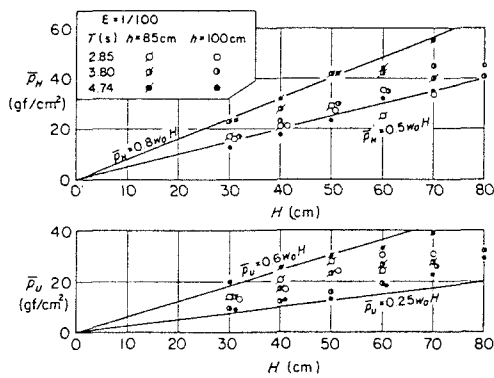


図-9 最大水平波力とその時の鉛直波力

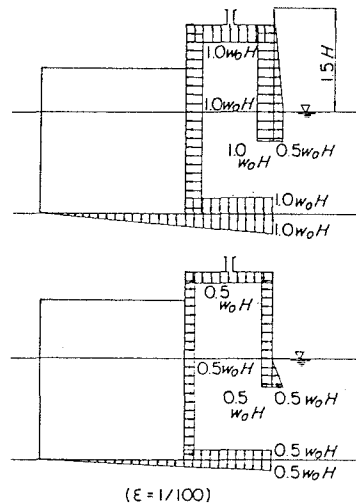


図-10 各壁に作用する設計波力

3. 耐波設計法の提案

(1) 基本的な考え方

波力発電ケーソンに働く波力は、波の周期や波高のみならず空気室の形状によっても大きく変化する。特にノズルの開口率は波力の発生機構を変え、圧力の大きさに大きく影響する。ノズルを閉じたりあるいは大きく開けたりすることは、かえって波力を増大させるため避けるべきである。しかしながら、波高が非常に大きい場合には空気室内の水位が高くなり、タービンや発電機内に海水が侵入する恐れがあり、タービンの開口部を閉じる必要がある。このときには、同時に別のノズルから空気流を逃がすことが不可欠である。もちろん、空気室内のノズルの開口部の位置は、できるだけ静水面より上方のほうが望ましい。

(2) 各壁面の設計波力

図-10 は $\epsilon = 1/100$ の場合について、実験結果から安全性を考慮しつつ大胆に数値を丸め、設計に用いる各壁面の波圧分布を決めたものである。すなわち、空気が圧縮されている時には空気室に $1.0 w_0 H$ の圧力が作用し、膨張時には $0.5 w_0 H$ の負の圧力が作用していると考ええる。この図では $\epsilon = 1/100$ であるが、ノズルの開口率が空気出力を最適にするような値であれば、この図の波圧分布を適用できると考えられる。

(3) 設計合波力

$\epsilon = 1/100$ の場合には、波力発電ケーソンは直立消波ケーソンと同様に反射波を消波しており、直立消波ケーソンの一つとも考えることができる。谷本・高橋・北谷³⁾ は直立消波ケーソンに作用する波力の算定式として通常のケーソンに作用する波力の算定式を準用する方法を示している。ここではその方法にならい、波力発電ケーソンに働く波力の算定式を以下のように与える。すなわち、空気室前壁の開口部が無いとしてその位置にも波力が作用するとし、図-11に示すような波圧分布を考える。この図において、

$$\eta^* = 0.75 (1 + \cos \beta) \lambda_1 H_{\max} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) \times \lambda_1 w_0 H_{\max} \quad (2)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (3)$$

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_3 \alpha_1 w_0 H_{\max} \quad (4)$$

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_3 \alpha_1 w_0 H_{\max} \quad (5)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4 \pi h / L}{\sinh (4 \pi h / L)} \right]^2 \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3 h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2 d}{H_{\max}} \right\} \quad (7)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh (2 \pi h / L)} \right] \quad (7)$$

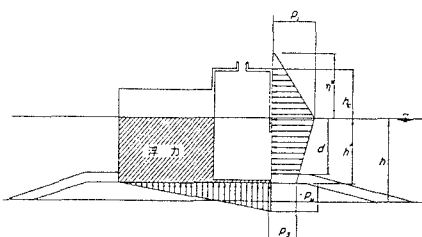


図-11 波力算定式における波圧分布

η^* : 静水面上波圧強度が0となる高さ
 p_1 : 静水面における波圧強度
 p_3 : ケーソン下端における波圧強度
 p_u : 前し揚圧力強度
 h : ケーソン前壁面における海底面水深
 h_b : ケーソン前壁面から沖側に有義波高の5倍だけ離れた地点での水深
 h' : ケーソン基面水深
 d : 根固め工またはマウンド被覆工どちらか小さいほうの水深
 w_0 : 海水の単位体積重量
 H_{max} : 設計計算に用いる最高波高
 L : 水深 h における設計計算に用いる波長
 β : 防波堤法線の垂線と、波の主方向から $\pm 15^\circ$ 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補正係数

式(1) から式(7) において、 λ_1 と λ_2 が1.0 であれば通常のケーソンに作用する波力と同じである。波力発電ケーソンの場合には、 λ_1 は1.0 のままであるが λ_2 を0 とする。これは消波による波力の減少を考慮したものである。

滑動に寄与する水平波力は、水平波力 F_H と鉛直波力 F_V そしてケーソン底面の摩擦係数 μ によって、 $F_H + \mu F_V$ と表される。滑動に寄与する波力の実験値とこの算定式で計算した計算値とを比較した。水深が100cm の条件では、実験値と計算値との比は0.5 から0.9 の間にあり、計算値はやや安全側の値となる。一方、水深が85cm の条件では0.8 から1.0 のあいだの値となり、計算値がほぼ妥当であることを示す。水深が浅い方が比の値が大きいのは、水深が85cmの方が前壁の没水水深が小さく、波面が前壁の下端以下となることが多く、しかも空気を閉じ込める時の波面の上昇速度がより大きいため波力が大きくなると考えられる。いずれにしても、条件によっては計算値が過小となることもありうることに注意すべきである。また、上述した算定式は、捨石マウンドが比較的低くかつ海底勾配が1/100 で穏やかな場合について求めたものである。衝撃砕波力が発生する可能性がある場合などについては、今後検討する必要がある。

(4) 試設計例

波力発電ケーソンの全体像を把握するために、十分ではないがこれまで明らかにされた方法に基づいてケーソンの設計を実施した。ここに示す例は、水深-19m の位置に波力発電ケーソンによる防波堤を設けることを想定している。ただし、設計潮位はH.W.L. = +0.5m L.W.L. = 0.0m、設計波の有義波高が10.9m 周期が15s、入射角度が6度とした。最高波高は砕波で14.8m である。

図-12は、ケーソンの概略図を示すものである。波力発電ケーソンの設計においてまず決めなければならないのは空気室の幅 B である。この幅によって空気出力は異なり、発電量は異なる。但し、空気出力の総量が最大となるようにこの幅を選ぶことが全体として最適となるとは限らない。幅の最適値の決定は困難であるが、ここでは $B = 7\text{m}$ とした。このとき幅 B は周期6s の波の波長の12.8% となり、最適値の15% に近い。

図のケーソンは、前壁が45度傾斜した斜面ケーソンとなっていることに特徴がある。斜面ケーソンは、斜面に作用する波力の鉛直成分がケーソンの滑動を防ぐ力として寄与するため、耐波安定性が高い。しかし越

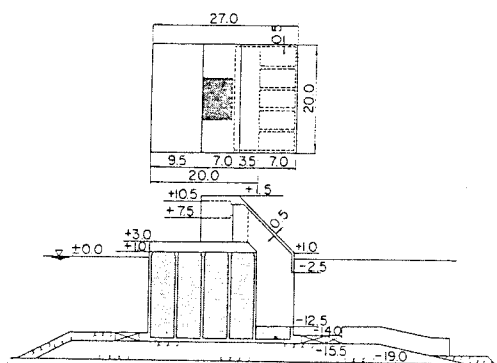


図-12 波力発電ケーソン防波堤試設計例

波量が多くなるため、通常のケーソンでは静水面上有義波高の0.6 倍の天端高さをとればよいとされるのに対し、1.0 倍の天端高さをとらなければならない。一方、波力発電ケーソンの空気室の高さは、タービンの開口部に海水が侵入することがないようにできるだけ高くする必要がある。したがって、波力発電ケーソンの前壁を斜面にすることは合理的であると考えられる。当然、波力発電ケーソンの消波能力によって越波量が通常の斜面ケーソンより減少するという効果も期待できる。ただし、傾斜した前壁に作

用する波力をふくめ、こうした斜面形状の波力発電ケーソンに働く波力については、今後十分に検討されなければならない。

前壁は-2.5mまでは鉛直壁であるがそこから-12.5m までが開口部となる。前壁の没水水深は深いほど空気出力が低下するが、浅ければ大きな波の場合に空気室が大気に解放され易く、しかも再び空気を閉じ込める時に波面上昇速度が速く圧縮圧力が大きくなる危険性がある。また、空気室が大気に解放されると空気出力は著しく低下する。前壁の没水水深はこうしたことを考慮して決められなければならない。

前壁が斜面であれば、空気室の幅は高い位置ほど狭くなってしまう。このケーソンでは機械室をできるだけ後ろに位置させることにより、空気室の水平方向の幅が変わらないようにした。なお、空気室内の水位がL.W.L.上8.0m以上となるとタービン開口部から海水が侵入する。規則波に対する計算では波高14.8m で+6.5m まで水位が上昇する。したがって計算では一応最高波高でも海水は侵入しないことになる。しかしながら計算は正弦波に対するものであり、砕波による水位の上昇や波の非線形性あるいは不規則性を考慮していなく、実際の水位はこれ以上になる可能性がある。このケーソンでは、H.W.L.上最高波高の0.5 倍の高さを目安にタービンの開口部高さが決められている。タービン開口部に海水が侵入する恐れのあるときは、さらに空気室の高さを高くするか、タービン開口部を遮断し別のノズルを開く装置を設けなければならない。

4. あとがき

波力発電ケーソンの耐波安定性に関して模型実験を行い、耐波設計法を提案するとともに試設計例を示した。ただし、実験は衝撃的な碎波力が作用しない条件で行われており、また試設計で示した前壁が斜面になった場合は含んでいない。今後こうした条件についても検討を進めたい。この研究を実施するにあたり港湾技術研究所の合田良実所長および谷本勝利防波堤研究室長には貴重な助言をいただいている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)高橋重雄：波力発電ケーソン防波堤の開発、昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集、1985.12、pp.1-57.
- 2)谷本勝利・高橋重雄・村永努：直立消波ケーソンの上床板に働く揚圧力-空気圧縮モデルによる検討、港研報告、第19巻1号、1980、pp.3-31.
- 3)谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄：混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力の発生と対策について、港研報告、第20巻2号、1981、pp.3-39.