

斜面スリット型ケーソンの開発とその水理特性

角湯正剛*・阿部宣行**・田中寛好***・斎藤昭三****

1. ま え が き

大規模の臨海型石炭火力や将来の海上立地式原子力発電所の防波堤・護岸は、20 m 以深の大水深部に建設される趨勢にある。水深の増大に伴い波浪条件が厳しくなり、消波ブロックを用いて前面を被覆する従来型の防波堤・護岸を建設する場合、ブロックの重量の増加と個数の増大のため経済性に問題があり、コストダウン技術の開発が最大の課題である。このような観点から、大水深部に適した合理的かつ経済的な防波堤・護岸型式の検討を行い、模型縮尺を数種類変えた水理実験を行い、消波ブロックを使用しなくても消波、防波機能の面で満足できる新型ケーソンの開発を行ってきた。

本研究は、このような目的に合致した斜面スリット型ケーソンの開発過程と水理特性を調べ、当該ケーソンの断面設計法を提案し、現地へ適用した場合を想定し、従来型式の消波ブロック被覆堤との経済性の比較を行った結果について述べるものである。

2. 斜面スリット型ケーソンの開発と水理特性

従来型式の防波堤より優れた機能を有し、かつ経済的な防波堤としては、耐波浪安定性には、単純斜面堤が、反射率の低減には、スリット型ケーソンが有利であることは、知られている。これらのケーソンを単純に組み合わせた構造 (A-1 型) を基本として種々検討し、所期の目的に適った斜面スリット型ケーソン (A-4 型) を開発した。その過程は、図-1 に示す通りである。

スリット、遊水部、斜面を組合せただけの断面形状では、従来型の直立式混成堤と比較すると波力は小さいが、防波機能、反射特性の面で不利となる欠点を有している。これ等の問題点を解決す

るため、種々の実験を行った結果、越波の低減対策には、ケーソン天端背後に滞水池を設け、滞留した水は、ケーソン内に埋設した排水管を通して前面海域へ還すこととした¹⁾。前面海域としたのは、水位差が大きくとれるためであり、設計条件 $h=20\text{ m}$, $H=15\text{ m}$, $T=16\text{ s}$ の場合、排水管直径 2 m で排水でき、滞水池幅は、11 m 程度でよいことが実験で明らかになった¹⁾ (A-2 型)。縦スリット型ケーソンの反射率は、既往の研究結果によれば、次のような無次元パラメータの関数として表わすことができる。

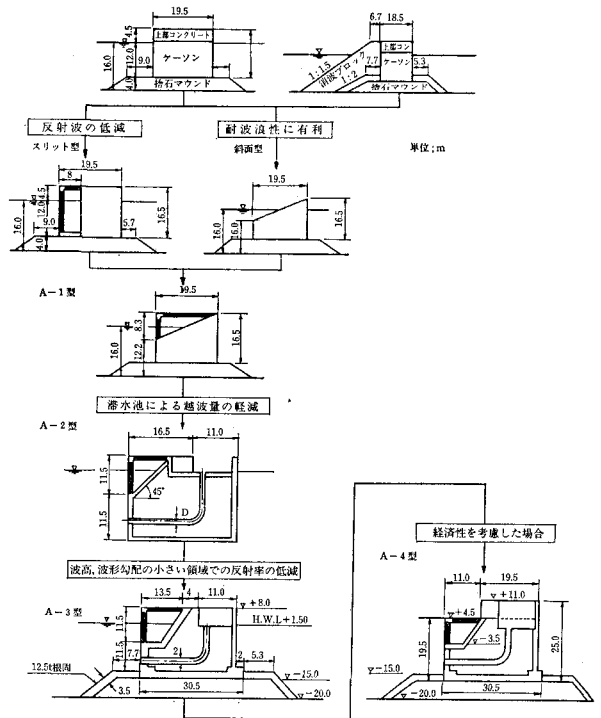


図-1 斜面スリット型ケーソンの開発過程

$$K_R = f \left\{ \frac{h}{L}, \frac{H_1}{L}, \varepsilon, \frac{B}{L_2}, q, f, \frac{\delta}{L} \right\} \dots (1)$$

ここに、 L, L_2 : それぞれ水深 h , qh における波長、

* 正会員 工博 電力中央研究所経営調査課長
 ** 正会員 電力中央研究所我孫子研究所水理部
 *** 正会員 工修 電力中央研究所 企画部
 **** 電力中央研究所我孫子研究所水理部

B/L_2 : 遊水室の相対幅, ϵ : スリット開口比, q : 全水深に対する透過壁の相対深さ, f : 損失係数, δ/L : 波長に対する有効慣性長の無次元量である. 式(1)において構造物で変えうる項は, ϵ , B , q であり, q は, 反射を対象とする波浪条件で決定される. ϵ は, 既往の研究結果から²⁾ 反射率が比較的小さくなるのは 30% 付近であり, A-1 型ケーソンの実験からも ϵ は, 20~35% が有効であることが確認されている. その結果からスリットの空隙率は, 35% とした. また上部スリットは, 背後に滞水池があることから, ほぼ全開構造とした. 遊水室幅については, 次章で述べる (A-3 型).

A-3 型ではスリット部がかなり大きくなるため, 上部工を高くし, スリット部の天端を下げて施工性, 経済性をよくした. この最終的な断面である A-4 型ケーソンの水理特性を縮尺 1/10 の大規模模型を用いて検討した.

3. 水理特性とケーソンの断面設計法

(1) 実験方法および実験条件

水理特性を調べるための実験は, 長さ 205 m, 幅 3.4 m, 深さ 6 m の大型二次元造波水路内に 図-2 に示すような地形とケーソン模型を設置して行った.

ケーソンに作用する波力の測定は, 水平・鉛直方向に 3 トンまで計測可能な防水型荷重計を中央ケーソン底と水路床に固定した鋼製架台との中間に取り付けて測定した. ケーソン各部に作用する波圧は, 定格容量 1 kg/cm² の波圧計を用いた. 反射率の測定は, 3 本の容量式波高計を模型前面に配置して入射波分離法により求めた. 越波量は, 幅 1.5 m, 高さ 1 m, 長さ 5 m の鋼製水槽をケーソン模型背後に配置し, 水槽内に貯留した水の体積と波数により越波流量を求めた. 港内伝達波高は, 模型中心から 10 m, 20 m の地点の波高を容量式波高計で測定した.

防波堤の設計条件は, 太平洋側の外海を対象として, 次の条件とした. 設計沖波 $H_0=15$ m, $T=16$ s, 設置水深 $h=20$ m (L.W.L. ± 0.0 m), $h=21.5$ m (H.W.L. + 1.50 m), 海底勾配 1/100 (砂質地盤) とした. この条件から求めた消波ブロック被覆堤の標準断面図を 図-3 に示す. 新型ケーソンの水理特性の優劣は, この被覆堤と比較することにした.

実験としては, 模型設置位置での波高 6.0~17.5 m, 周期 8.0~21.7 s の規則波と, 水深が 21.5 m (H.W.L.

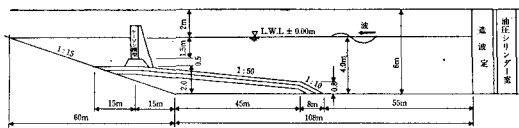


図-2 大型造波水路と模型配置図

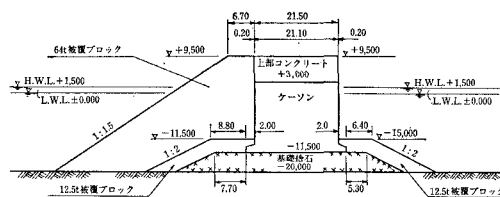


図-3 消波ブロック被覆堤標準断面図

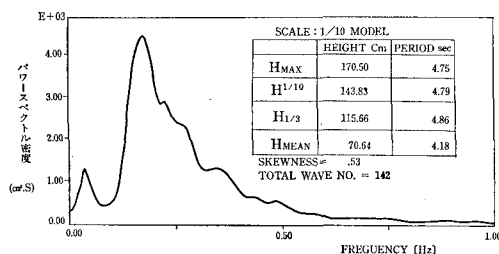


図-4 模型設置点での実験波のパワースペクトル

+1.50 m), $H_{1/3}=12$ m, $T=16$ s を不規則波の波浪条件としたが, 波長に対して水路長が短いのでケーソン模型からの再反射の影響が生じる. そのため, SIWEH 法による不規則造波実験を行い, 再反射が生じない時間間隔で大きな波高を含んだ時系列を 6 系列選び, これらの波形を実験波とした.

図-4 は, 模型設置点での進行波のパワースペクトルを示したもので統計解析の結果は, $H_{1/3}=11.6$ m, $T_{1/3}=15.4$ s となって, ほぼ設計条件を満たしている.

(2) 反射特性

斜面スリット型ケーソン (A-4 型) は, 消波ブロックをケーソン前面に設置することなく消波ブロックと同様の消波機能を持たせたものである. そのため, 消波機能の指標として, 反射特性を検討し, 消波ブロック被覆堤と同等となることを目標とした. 一般に小型船舶や漁船等の操業が可能な波浪条件は, 周期 8~13 秒, 波高 1~2 m 程度であろう. この条件を用い規則波を対象として反射率を求めた. 結果を 図-5 に示す. この図より斜面スリット型ケーソンの反射率は, 波形勾配 (H/L) の影響をさほど受けず, むしろ遊水室幅 (B) と波長 (L) の比に大きく関係し, 反射率が最小となるのは, B/L が 0.065 付近となっている. この結果から, 斜面スリット型の遊水室幅は, 周期 10 s 程度を対象として $B=0.065L$ とした (A-3, 4 型). この方法で決定した斜面スリット型 (A-4 型) の反射率は, 被覆堤より若干大きくなっているが, $H/L=0.02$ から 0.03 程度では, ほぼ 0.5 以下の値とすることが出来た.

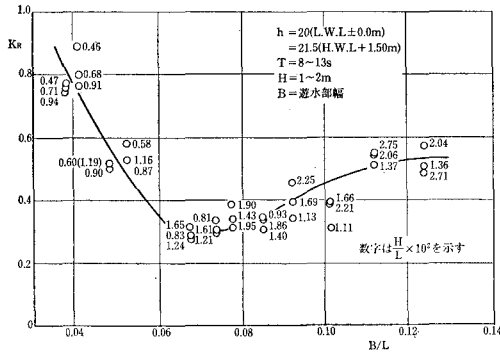


図-5 斜面スリット型ケーソンの反射率

(3) 波力・波圧および端趾圧

a) 波力特性

波力特性を調べることで、ケーソンがマウンド上で転倒や滑動しないこと、ケーソン港内側端趾圧がマウンドの支持力を越えるほど大きくならないことを確認しておく必要がある。滑動、転倒に対する安全率の値は、1.2 を採用し、次の式から算定した。

$$\text{滑動安全率 } S.F. = \mu(W - F_V) / F_H \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{転倒安全率 } S.F. = (Wl - M_V) / M_P \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 W ：ケーソンの静水中重量、 μ ：ケーソンと捨石マウンド間の摩擦係数である。

本ケーソンの水平波力の実験値を合田式で無次元化した値を、図-6 に示す。ここで、横軸は、堤体幅と波長との比をとっている。安全率を算定するための全波力は、安全を見込んで実験値の上限を包絡する曲線を用いることにした。また、ケーソンの滑動安全率が最小値をとった時の水平と鉛直波力の時間変化を図-7 に示す。図から、周期 16s の場合の鉛直波力は、水平波力が最大の時に、ほぼ零に近いことが判った。また、周期が 13s の場合は、最大水平波力の 2 割程度を見込んで設計すればよいことなどが実験で明らかとなった。

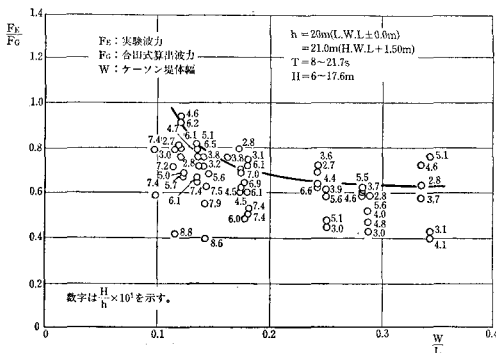


図-6 斜面スリット型ケーソンの水平波力

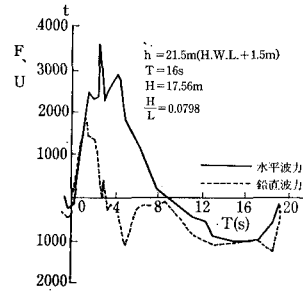


図-7 滑動安全率が最小値の水平・鉛直波力の波形

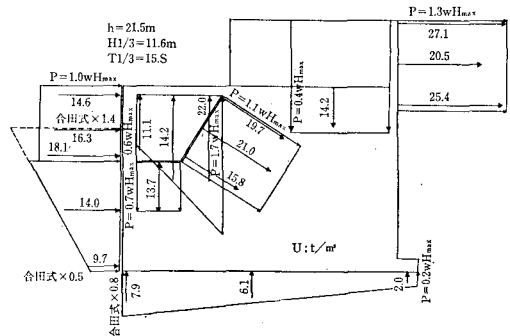


図-8 不規則波実験による波圧値と波圧分布算定モデルとの比較

b) 波圧特性

波圧特性の把握は、ケーソンの各部材厚と鉄筋量を決定する上で重要である。堤体断面が同じであっても、鉄筋コンクリート部の占める割合が小さい方が経済的に有利である。そのため波圧分布は、建設費算定の重要な要因となる。

図-8 は、実験からモデル化した波圧分布と不規則波実験での最大波圧値とを比較したものであり、波圧は、このモデル化した分布から算定できる。また、場所毎による波圧分布を見ると、静水面付近で最大とならず、水面下 3.5m のスリット付根付近で最大波圧が生じている。これは、静水面付近がスリットとなっているので急海底勾配で起こるような巻き砕波波形となるためであろう。斜面壁には、非常に大きな波圧が見られるが、これはスリット構造の特徴で重複波とはならず、スリット間隙で加速された波が直接、斜面壁に衝突するためと考えられる。スリット部、上部工、斜面壁、滞水池背面壁では、ほぼ一様分布であり、ケーソン底面では三角形分布でなく、台形分布となっている。

c) 端趾圧特性

ケーソン底版の版厚と、特に大水深になると、ケーソン断面幅は、滑動安全率より端趾圧 (P_e) の大きさによって決定されるため、その値は、建設費の算定上重要な

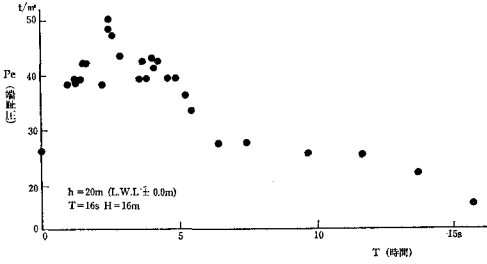


図-9 端趾圧 (Pe) の時間的変化

要因となる。端趾圧は、ケーソンマウンド下面のマウンド反力を台形または三角形分布と仮定して求めた。端趾圧の許容値は、 50 t/m^2 が一般に採用されてきたが、大水深部でのケーソンを設計する場合、ケーソン幅は、許容端趾圧によって決定されることが多く、従来の許容値を用いた場合、滑動、転倒安全率が過大となり、不経済な断面になってしまう可能性がある。そのため、 Pe 許容値を見直すべく運輸省で検討中である。

端趾圧に必要な回転モーメントは、ケーソンの主要な箇所に、波圧計を多数貼り付けて測定し、それ等の波圧から作用モーメントを算定し、端趾圧を求めた。

図-9 は、最大端趾圧が生じた時 ($h=20 \text{ m}$, $T=16 \text{ s}$, $H=16 \text{ m}$, 規則波) の端趾圧 (Pe) の時間的変化を求めたものである。これ等、数多くの実験結果から、最大端趾圧算定のための波圧分布のモデル化を行った。図-10 は、モデル化した波圧分布と実験値を比較したものである。すなわち、波圧分布としては、ケーソン下端から天端までは合田式の波圧分布で、斜面壁は、図中の波圧式で表わされる。その他、ケーソン底面、遊水室床、スリット上版波圧は、全体としては小さいので無視できる。滞水池内の波圧は、最大端趾圧時では、零であった。このモデル化した波圧分布を実験によって検討した結果は、 $h=20 \text{ m}$, $T=13 \text{ s}$, $H=14.9 \text{ m}$ の場合、計算では $Pe=51 \text{ t/m}^2$ 、実験値では $Pe=42 \text{ t/m}^2$ となって妥当であることが判った。

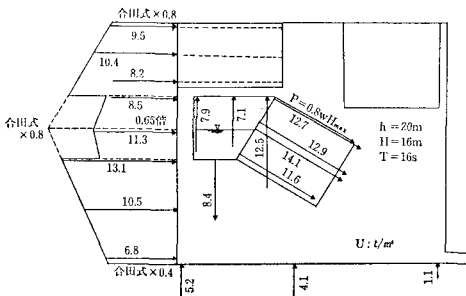


図-10 最大端趾圧算定のモデル波圧分布と実験波圧との比較

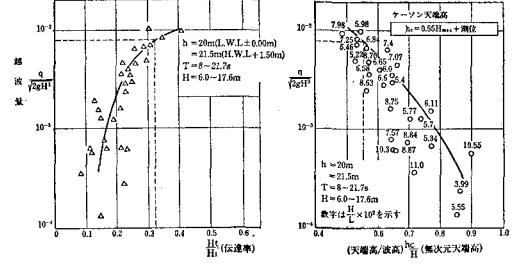


図-11 斜面スリット型ケーソンの伝達率と無次元天端高と越波流量との関係

(4) 越波および伝達波特性

消波ブロック被覆堤の天端高は、H.W.L. 上、設計波に対する有義波高の6割を目安として決められている。本ケーソンの天端高は、消波ブロック被覆堤の伝達率より小さいように設計した。伝達率および相対天端高と越波流量との関係は、図-11に示す通りである。この図から、被覆堤の伝達率よりも小さな0.32の値となる越波流量を左図より求め、右図の越波流量と天端高との関係から $hc/H=0.55$ と与えられる。それ故、天端高は、 $hc=0.55H_{max}+$ 潮位として求められる。

4. 経済性の検討

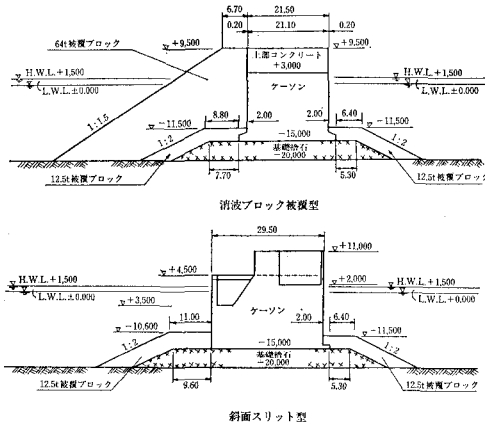
(1) 設計条件

経済性の検討に際しては、今後の外海の大水深部に建設される防波堤を対象とし、設計水深を10mから最大30m、また設計沖波高は、当所で調査した全国の設計波を参考として太平洋側では、沖波高 $H_0=15 \text{ m}$, $T=16 \text{ s}$ 、日本海側では、 $H_0=12 \text{ m}$, $T=13 \text{ s}$ 、潮位差1.5m、海底勾配は、 $\tan \theta=1/50$ とした。被覆堤の消波ブロック重量は、当所で行った大型模型実験から、模型縮尺効果を考慮したハドソン公式で $K_D=28.8$ とし算定した³⁾。

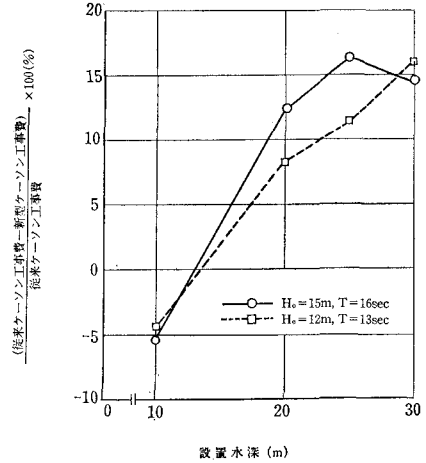
ケーソンの許容安全率は、滑動、転倒に対し1.2、施工時では、滑動1.1、転倒1.0とした。許容端趾圧は、現在防波堤の大水深化に伴い、運輸省で見直し作業中であるが、ここでは、水深ごとに10mで 50 t/m^2 、20mで 75 t/m^2 、25mで 90 t/m^2 、30mで 100 t/m^2 を判断基準とした。又施工性の面から、ケーソン一函当りの長さは、ケーソン幅の2倍程度とする。ケーソン製作作用のフローティングドックの規模は、設置水深が20m以下では6000t級、25m以下では12000t級とした。

(2) 工事費の算定

図-12 は、設置水深が20m、 $H_0=15 \text{ m}$, $T=16 \text{ s}$ の場合の消波ブロック被覆堤と斜面スリット型ケーソン堤の標準断面図を示したものである。図の標準断面図に基づいて、両者の各水深毎の工事費を算定し、消波ブロック被覆堤に対するコストダウンの割合(低減率)を求め



図—12 被覆堤と斜面スリット型ケーソン堤の標準断面図



図—13 斜面スリット型ケーソン堤のコスト低減率

た結果を図—13に示す。水深 10m では、従来ケーソンの方が安くなっているが、20m 以深では、新型ケーソンの方が 10～15% 工事費がコストダウンできる。

5. 結 論

(1) 斜面スリット型ケーソンの水理特性を実験的に検討して、堤体幅、天端幅、遊水室幅等の設計法を提案した。

(2) 上述の手法で設計した断面を用いて、縮尺 1/10 の大型模型を用いた水理実験結果から、本ケーソンの水理特性は、被覆型とほぼ同等かそれ以上の機能を有することが認められた。

(3) 外海に面した沿岸域で水深 10～30m、波高 9～

15m、周期 13～16s の条件で、両防波堤の経済性の比較をした結果、水深 10m では被覆堤 ($K_D=28.8$) より、やや割高となるが水深 20m 以深では、新型ケーソンの方が 10～15% の経済性が得られる。

参 考 文 献

- 1) 阿部宣行・田中寛好、他：大水深防波・堤護岸の経済設計、電力中央研究所報告、研究報告：385035、昭和 61 年 6 月。
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究、港湾技研報告、第 21 巻第 3 号 (1982. 9)。
- 3) 島田真行・藤本稔美、他：第 33 回海岸工学講演会論文集、昭和 61 年 11 月。