

半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力

谷本勝利*・吉本靖俊**・滑川伸孝***・石丸敬純****

1. ま え が き

断面が半円形の壁体には、その円周面に働く波圧の合力が底版の中心を通るため、底版に働く揚圧力による分を除いて偏心力が発生しないので、波の作用を受けても地盤反力が等分布に近いという特長がある。また、円周面に働く波力は波の峰のとき、鉛直下向きの成分を有しているなどのため耐波安定性の面から利点が多く、水深が比較的浅いところの防波堤や離岸堤等の海岸構造物として活用が期待される。筆者らはこうした略半円形断面構造を半円形ケーソンと呼び、実用化のための調査研究を1985年より進めてきた。その結果の一部、半円形ケーソンの特徴や活用の概念、軟弱地盤着底式防波堤としての試設計結果などについては既に第12回海洋開発シンポジウムで発表した¹⁾。本論文は水理実験による半円形ケーソンの特性、特に設計波力の算定法の検討について述べるものである。

2. 実験の方法

(1) 実験水路と模型

実験に用いた水路は運輸省港湾技術研究所の160 m長水路で、図-1に示しているように、ケーソン設置位置前方の勾配が1/100の海底模型を設けた。半円形ケーソンの模型は外寸半径が50 cmの半円周面と底版とから成り、アクリル合成樹脂で製作したものである。ただ

し、曲面壁が不透過のままのもの（基本型）、前半分の壁面に多数の孔を開けケーソン内部を遊水室として消波構造としたもの（消波型）、さらに背面にも孔を開け通水性を持たせたもの（透過型）の3種に大別される模型を用意した。写真-1はそのうち透過型の模型の例を示したもので、波の進行方向に平行な4枚の鉛直版は後述の全波力計に固定するためのものである。

(2) 反射・伝達実験

反射・伝達特性に関する実験は有義波周期が0.97 sから3.44 sまでの5種の不規則波により実施した。波高レベルはそれぞれ3種に変化させ、碎波が作用する条件を含めた。実験で対象とした構造は前半分の開口率 ε_f が

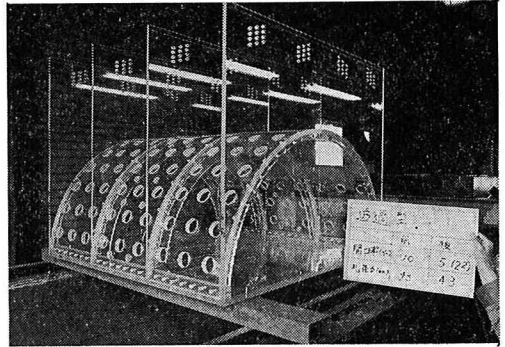


写真-1 透過型の模型

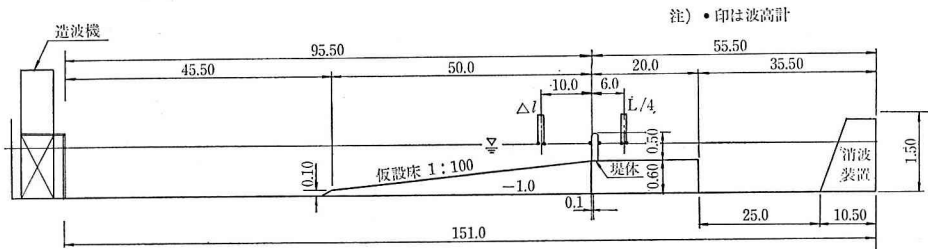


図-1 実験水路（単位：m）

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部防波堤研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所（前港湾技術研究所）
 *** 正会員 工修 （財）沿岸開発技術研究センター 調査研究部主任研究員
 **** 半円形防波堤共同研究グループ

0~0.3, 後半分の開口率 ε_r が0~0.15の範囲で適当に組み合わせた14種で, 水底に直接設置する形式である。水深は30, 33, 36 cmの3種に変化させた。

(3) 波力実験

4個の二分力検出器を用いた全波力測定装置および超小型波圧計(12~30個)を使用して, ケーソンに働く全波力(水平および鉛直分力)と局所的に働く波圧を同時に測定した。実験波は周期1.13~3.68 sの4種の規則波で, それぞれ波高を4種に変化させた。対象とした構造は, 基本型, 消波型($\varepsilon_f=0.20$)のほか, 前後の開口率を3種に組み合わせた透過型の合計5種である。水深は33 cmで一定とした。

3. 実験結果

(1) 反射・伝達特性

図-2は基本型, 消波型の反射率 K_R および伝達率 K_T を例示したものである。入射波の波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}=0.036$ に対し, $\varepsilon_r=0$ で, ε_f を0, 0.1, 0.2, 0.3と変化したときの値を, 横軸に相対水深 $h/L_{1/3}$ をとってプロットしている。実験では, さらに直立壁体の反射・伝達率との比較を直接行っている。これらの結果に基づいて, 円形ケーソンの反射・伝達特性を次のようにまとめることができる。

① 基本型の反射率は直立壁体より若干小さくなるにすぎない。一方, 伝達率は同じ天端高の直立壁体より大きく, 天端高 $0.6 H_{1/3}$ の直立壁の伝達率とほぼ等しい半円形ケーソンの天端高は $(1.0\sim1.2) H_{1/3}$ となる。また, 天端高 $0.6 H_{1/3}$ の半円形ケーソンの伝達率は0.4程度である。

② 消波型の反射率は直立消波ケーソンに類似した特性を示す。 $\varepsilon_f=0.2$ のとき, 入射波の有義波波長に対するケーソン内静水面幅が0.25程度で, 極小反射率が約

0.3となる。伝達率は開口率が大きいほど小さくなる傾向にある。 $\varepsilon_f=0.2$ のとき, 天端高 $0.6 H_{1/3}$ の直立壁と同じ伝達率となる半円形ケーソンの天端高は $0.8 H_{1/3}$ 程度である。

③ 透過型の反射・伝達率は前面開口率と背面開口率の組み合わせで大きく変化する。 $\varepsilon_f=0.2$, $\varepsilon_r=0.02$ 程度のときエネルギー消費率が全体に高く, 実験条件の範囲で, 反射率0.5程度以下, 伝達率0.3程度以下となる。

(2) 波力特性

図-3は $T=2.83$ s, $H=24.5$ cmの入射波が基本型に作用したときの波圧や全波力の測定記録の例を示したものである。左側の記録は曲面前壁各測点での波圧で, 位置によって大きさのみならず, ピークの起時に違いがあることがわかる。一方, 右側の上から2番目の f_x は全水平波力を受圧投影面積(RI , l : ケーソンの延長方向の長さ)で割った水平平均波力強度(背後に押す方向を正とする), 3番目の f_z は全鉛直波力を受圧投影面積($2RI$)で割った鉛直平均波力強度(上向きを正とする)である。4番目と5番目の f_u と f_{cz} はそれぞれ底面に働く揚圧力と曲面壁に働く波力の鉛直成分の同様な平均強度で, $f_z=f_u+f_{cz}$ の関係にある。1番上の f_s は次式で表される滑動合成波力強度である。

$$f_s=(f_x\pm 2\mu f_z) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, μ は摩擦係数で, 本計算では0.6を用いている。この滑動合成波力はケーソンの抵抗力がこれより小さいと滑動が生じることを表す。つまり, f_s が最大のときが滑動に対して最も危険なときで, この例の場合底面に働

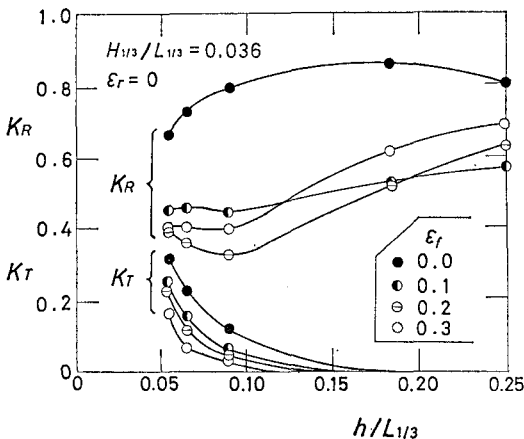


図-2 開口率による反射・伝達率変化の例

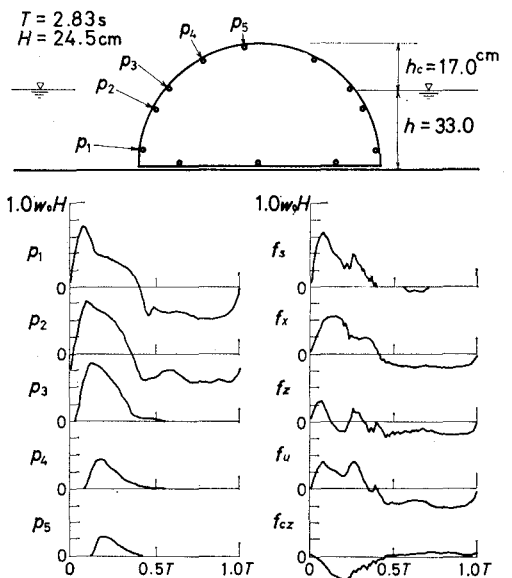


図-3 基本型に働く波力の測定記録の例

く揚圧力が最大となるときに一致している。また、水平波力が最大となるのはやや後で、このときには鉛直波力はほとんど0、すなわち曲面壁に働く波力の鉛直成分と底面に働く揚圧力が相殺している状態に対応する。これらの特徴は他の条件でもほぼ同様である。

これに対し、図-4は同条件での消波型 ($\varepsilon_f=0.2$) に作用する波圧および波力 (f_x のみ) の記録例である。この場合には波圧はケーソンの外面のみならず、内側面にも働く。そのため、外側の波圧については添字 o 、内側の波圧については添字 i を付けて区別してある。

消波型の場合の著しい特徴は、記録に10数ヘルツの振動が発生することである。これは実験における観察によって、外側波面が開開口を覆った瞬間に、内部上部に水面が当たっていても発生することが確かめられていることから、内部に閉じ込められた空気の高圧を介した衝撃圧力であることは間違いない。こうした空気圧縮による衝撃圧は大きさは減じるけれども透過型にも現れる。これは今回の実験では透過型の背面側の孔は静水面以下にのみ開けており、そこから水の噴出はあるものの上部に空気が閉じ込められることによる。

4. 波力の算定法

(1) 安定性等の検討に用いる波力の位相

以上に例示したような波力特性を考慮し、半円形ケーソンに働く波力の算定法を検討した。半円形ケーソンの安定性等の検討に用いる波力は次の三つのタイミングの波圧分布を考えればよい。

① 波の峰付近で底面に働く揚圧力が最大となるときの波圧分布

② 波の峰のときで、水平波力が最大となるときの波圧分布

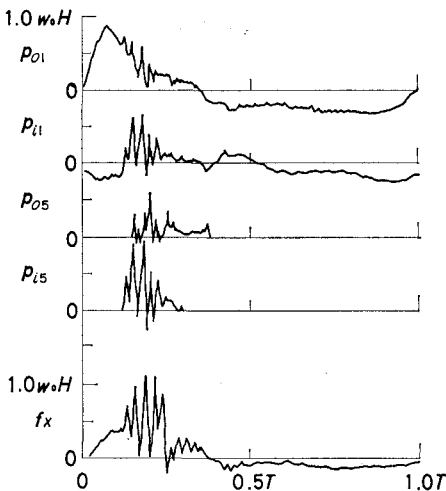


図-4 消波型に働く波力の測定記録の例

③ 引き波および波の谷のときの波圧分布

このうち、②のタイミングは消波型や透過型では必要により内部に生じる衝撃圧分布を考慮しなければならない。以下、①、②のタイミングでのケーソン外側面に働く波圧分布、②のタイミングでの内部に生じる衝撃圧の分布について述べる。③については前面の水位低下が入射波高の0.5倍としたときの静水圧の変化を考慮すればよいが、隔壁が無い場合などでは斜め入射波に対しさらに安全側の状態を想定する必要がある。

(2) 半円形ケーソンの外周面に働く波圧分布

断面が完全に半円形である理想的な形状を対象とする。その外周面に対しては、図-5の(Ⅲ)に示しているように、円周面では前半分に波圧 $p(\theta)$ が曲率の中心に向かって、底面では前端で p_u 、後端で0の三角形分布の揚圧力が上向きにそれぞれ働く分布を考える。ここに、 θ は曲率の中心から見た円周面上の波圧の作用点の仰角である。これらの波圧分布を規定するのに、直立壁に働く合田式による波圧分布を利用する。

図-5の(Ⅰ)はその合田式²⁾による前面波圧分布で、代表波圧強度等は添字 G を下付けて表す。ただし、消波型、透過型に対しては、合田式をそのまま用いるのではなく、波圧係数 α_2 を0とするほか、揚圧力最大時に対しては波圧の作用高さおよび前面波圧に対し低減係数0.8を乗じた分布とする。これから中間的に(Ⅱ)に示した分布を考えるが、これは円周面の各位置でピーク値の発生に位相差があることを考慮して(Ⅰ)の分布を予め修正するもので、揚圧力最大時と水平波力最大時にわけて次のように与える。

① 揚圧力最大時

$$\eta' = \lambda_p \eta_G \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p_1' = \lambda_p p_{G1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$p_3' = p_{G3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

② 水平波力最大時

$$\eta' = \eta_G \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$p_1' = p_{G1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$p_3' = \lambda_p p_{G3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\lambda_p = \cos^4(2\pi \Delta l / L) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Δl : 曲面下端と曲面の静水面との交点の間の水平

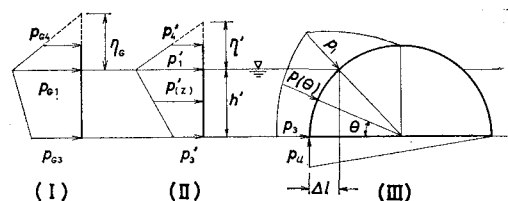


図-5 半円形ケーソン外周面に働く波圧分布

距離

L : 入射波の波長

この仮想的な波圧を一般に $p'(z)$ と表記し、半円面に働く波圧を最終的に次式で与える。

$$p(\theta) = p'(z) \cos^2 \theta \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに、 z は底面からの鉛直上向きの座標で、 θ と一義的な関係にある。波圧 $p(\theta)$ は壁面の実質部分にのみ働く波圧である。

一方、揚圧力については、揚圧力最大時と水平力最大時に對し、それぞれ次のように与える。

① 揚圧力最大時

$$p_u = p_{Gu} \quad \cdots \cdots (10)$$

② 水平波力最大時

$$p_u = \lambda_p p_{Gu} \quad \cdots \cdots (11)$$

(3) 空気圧縮衝撃圧

消波型や透過型の場合のケーソン内部に働く空気圧縮衝撃圧は図-6に示すような分布とし、(2)の水平波力最大時に對してのみ同時に作用するものとする。曲面壁前半分の内側に働く衝撃圧は $\theta=0^\circ$ での $\lambda_a p_a$ から $\theta=90^\circ$ での p_a まで直線的に増大する。この λ_a の値は0.5である。また、空気圧縮衝撃圧 p_a は半円形ケーソンを上床版を有する直立消波ケーソンに置き換えて、高橋ほかの方法³⁾によって算定する。計算法の詳細は文献を参照されたい。ここでは、置き換えの考え方を述べる。図-7はその置き換えを説明したものである。図中、S.W.L. は静水面を表し、 s_0 は前面開口部上端の静水面からの高さ、 θ_0 はその仰角を表す。すなわち外側水位が高さ s_0 に達した瞬間に内部に空気が閉じ込められる。そのときの内部水面幅を B_0 と表記し、半円形ケーソンを遊水室幅が B_0 、上床版の静水面上高さが s (半円形ケー

ソン内側頂部の静水面上高さ)、前面壁の不透過部の下端の静水面上の高さが s_0 、その下の透過部の高さが $R\theta_0$ (θ_0 はラジアン) の直立消波ケーソンに置き換える。この透過部の高さは半円形ケーソンの透過部の円周面に沿う長さに等しくとったものである。ただし、遊水室の幅 B_0 は内水位の上昇とともに半円形ケーソンの内部水面幅の変化に応じて変わる変数とする。また、前面透過部の開口率は消波型に対しては ε_f をそのまま考えるが、透過型に対しては $(\varepsilon_f - \varepsilon_r)$ に等しい仮定の開口率とする。これは前面開口率を小さくすることによって、背後への水の流出効果などを簡単な形で考慮したものである。

空気圧縮衝撃圧の計算は前面外側での水位変動に對し流入方式による逐次計算によって、空気が閉じ込められる瞬間の内部水位と水面の上昇速度を求め、それを初期条件として Bagnold 型空気圧縮衝撃圧を求めるものである。その際、透過壁からの空気漏れの効果を考慮する。前面水位は静水面から入射波高 H_I の1/4だけ水位が低下しているとき内部水位と等しい状態にあって、これを初期状態とし、半振幅が $1.25 H_I$ の正弦変化で与える。したがって、 H_I が s_0 より大きいとき、空気圧縮衝撃圧が発生することになる。これらは半円形ケーソンに對して、実験結果などからは妥当なモデルとして採用したものである。なお、空気漏れの効果については直立消波ケーソンの場合の結果をそのまま用いる。

5. 計算波力と実験波力の比較

以上の算定法を用いて半円形ケーソンに働く波力を計算し、実験結果と比較する。図-8は、開口率の異なる5種類の半円形ケーソンに働く水平波力最大時の水平平均波力強度 f_x を、横軸に入射波高 H をとって示したもので、周期が3.68sの例である。基本型の場合は、内部に波圧が働かないので、波力は波高に比例して増大し、計算値は実験値によく合っている。消波型、透過型では波高がある値(この場合約15cm)を超すと内部に空気圧縮衝撃圧が発生するようになり、波力の変化に変曲点が生じる。消波型の計算値は実験値とほぼ合っているが、透過型については傾向は合っているものの、衝撃圧が発生する場合には、計算値が明らかに大きい結果を与える。これは圧縮時の背面孔からの水の流出や空気漏れの効果などの評価が計算においてやや低めであることが主因と考えられる。ただし、空気圧縮衝撃圧は $w_0 H$ (w_0 は水の単位体積重量)で割って無次元化して表示したとき、現地スケールでは実験値の1/2~1/3に減じ、実験で顕著なほどには大きくない。これは直立消波ケーソンの現地観測結果でも例証されており³⁾、ここで用いた方法は現地諸元に適用すればこれを考慮した結果を与

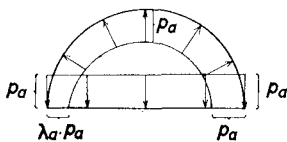


図-6 空気圧縮衝撃圧の分布

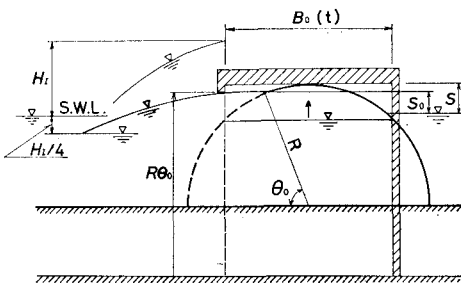


図-7 半円形ケーソンの直立消波ケーソンへの置き換え

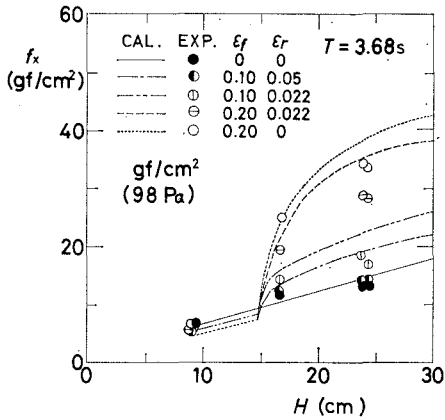


図-8 波高による水平波力の変化

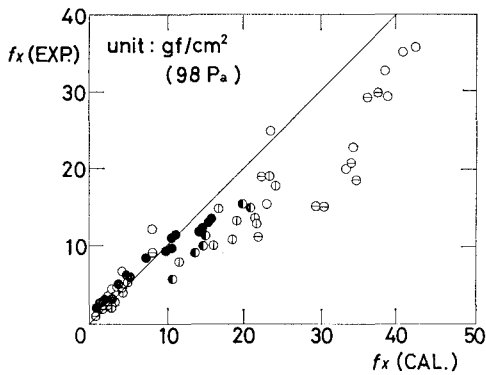


図-9 水平平均波力強度の計算値と実験値の相関 (水平波力最大時)

える。

図-9, 10 は今回実施した全ケースについて、水平波力最大時の平均波力強度 f_x と、そのときの底面に働く揚圧力を除いた鉛直平均波力強度 f_{cz} の計算値と実験値の相関を示したものである (図中の記号は図-8に同じ)。水平波力については強度が小さいとき実験値がやや大きい傾向を示すが、設計で問題となる強度の大きい条件では計算値は実験値のほぼ上限を表しており、安全側の結果を与えている。一方、曲面壁に働く波力の鉛直成分と底版上面に働く波圧の和に対応する f_{cz} はこのとき負の値すなわち揚圧力を打ち消すように下向きに働く。一部、絶対値で計算値が実験値を上回るものもあるけれども、全体としては計算値はやや安全側の値を与え

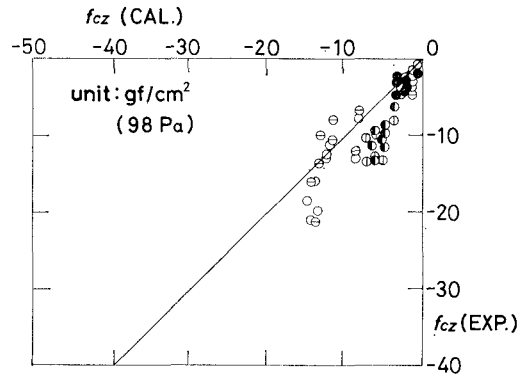


図-10 揚圧力を除いた鉛直平均波力強度の計算値と実験値の相関 (水平波力最大時)

ることがわかる。

6. むすび

以上、半円形ケーソンの水理特性を実験によって明らかにし、一応の波力の算定法を得た。今後、マウンドを有する場合について検証を行うとともに、半円形ケーソンのさらに実用的な形状について設計法を検討していく必要がある。

なお、本研究は運輸省港湾技術研究所と、(財)沿岸開発技術研究センターおよび参画企業 (五洋建設、大都工業、東亜建設工業、東洋建設、ピー・エス・コンクリート、若築建設の各株式会社) から成る半円形防波堤共同研究グループの共同研究として実施した一部である。実験に際しては、田川昌宏氏 (前(財)沿岸開発技術研究センター)、坂元清氏 (大都工業)、木俣陽一氏 (若築建設) の協力を得た。また、空気圧縮衝撃圧の算定法については港湾技術研究所の高橋重雄波エネルギー研究室長のご教示を得た。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・奥村樹郎・滑川伸孝・橋詰文伯・石丸敬純: 半円形防波堤の開発について, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 7~12, 1987.
- 2) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp. 2-106~2-114, 1979.
- 3) 高橋重雄・谷本勝利: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp. 3~25, 1984.