

半円形防波堤の開発について

運輸省港湾技術研究所	正会員 谷 本 勝 利
半円形防波堤共同研究グループ	正会員 奥 村 樹 郎
同 上	正会員 滑 川 伸 孝
同 上	橋 詰 文 伯
同 上	石 丸 敬 純

1. まえがき

波の進行を阻止して静穏な海域を造成する防波堤は大波浪、軟弱地盤など苛酷な自然条件下での建設が宿命といえる。これに加えて、近年では低反射性などの性能のほか、景観などのソフト面を考慮した構造等、多様な要請に応えることも一層重要となってきた。特に、人間生活の場に近い水深の浅いところでの構造物においては、そうしたソフト面での配慮が今後ますます重要化すると考えられる。

こうした背景のもとに、大波浪、軟弱地盤などのハードな面で有利な特長を持ち、かつソフト面での対応の可能性も秘めている半円形断面構造を沿岸構造物の一つの基本形としてとりあげ、これの実用化の検討を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、ビー・エス・コンクリート、若築建設の各株式会社)より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てきた。共同研究は3か年計画であり、初年度の昭和60年度には半円形構造の基本的な水理特性を明らかにするための実験を行い、昭和61年度にはその結果を分析して設計波力の算定法をとりまとめるとともに、試設計などを行って、実用化の可能性等を検討した。本報告は半円形構造の特徴や活用概念を示すとともに、それらの成果のうち、設計波力の算定法、および活用の一つと考えられる軟弱地盤での軟着底式防波堤としての試設計の結果を紹介するものである。

2. 半円形ケーソンの特徴と活用概念

2.1 半円形ケーソンの特徴

基部に底版を有し、断面が略半円形である構造を総称して半円形ケーソンと呼ぶ。そのうち、曲面壁が不透過なものを基本型、曲面壁の前半分に多数の孔をあけ、ケーソン内部を遊水室としたものを消波型、後半分にも孔をあけ通水性を持たせたものを透過型と呼んで区別する。

半円形基本型のハード面における特長を列挙すると以下のとおりである。

- ① 曲面構造であるので部材強度を確保しやすく、部材量を節減できる。
- ② 半円形面に作用する波圧は同位相でないので、その合波力の水平成分は鉛直壁に作用する波力よりも小さい。また、鉛直成分は壁面を下向きに押さえる方向に働くため、耐波安定性がよい。
- ③ 半円形面に作用する波力は円の中心を通るので、これによる回転力が生じない。その結果、地盤反力は略等分布となり軟弱地盤で有利である。
- ④ 没水状態にあるとき、流体抵抗が小さい。

2.2 半円形ケーソン活用概念

前節で列挙した半円形ケーソンの特長を活かして、次のような小水深での外郭施設および大水深を含めた潜水構造物としての活用が期待される。

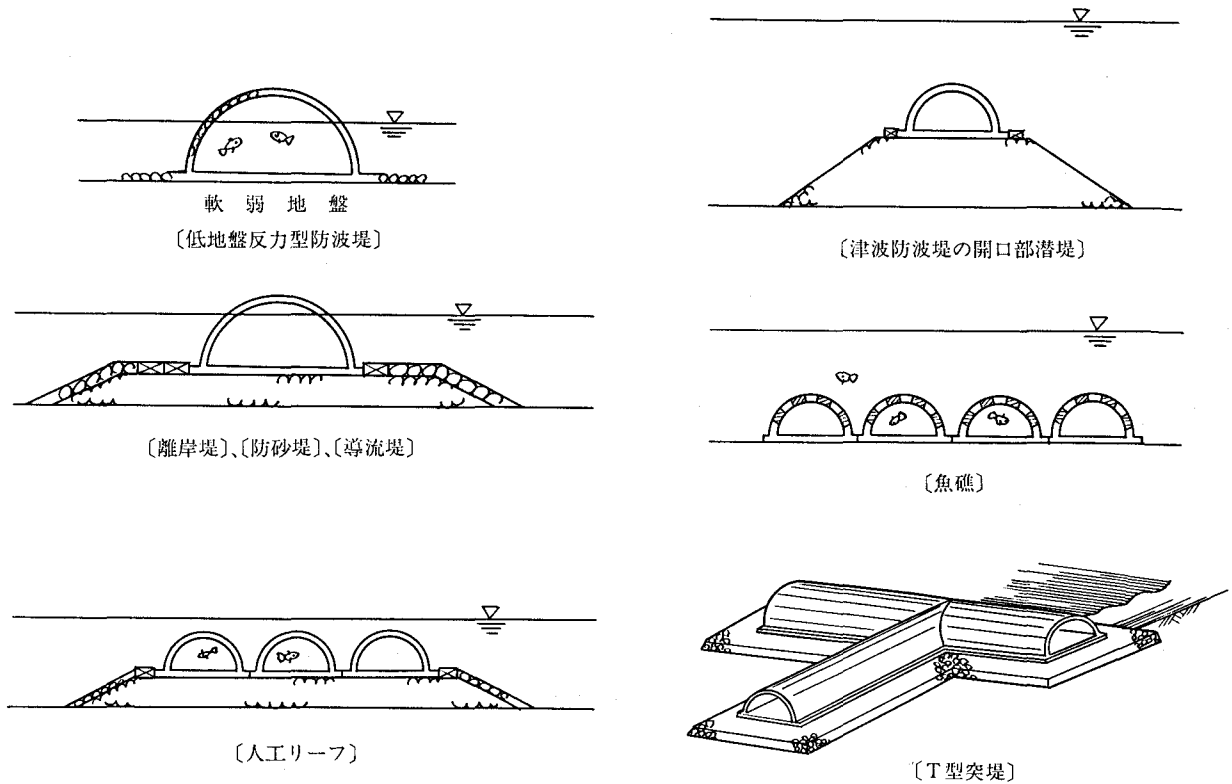
(1) 沿岸での外郭施設として

- ① 軟弱地盤上での低地盤反力型防波堤
- ② 高い耐波安定性を有した離岸堤
- ③ 簡易な防砂堤、導流堤、突堤
- ④ ケーソン内部空間を水産などへ利用する複合施設

(2) 潜水構造物として

- ① 潜堤の頂部工(津波防波堤開口部潜堤、人工リーフ)
- ② 流れ制御構造物
- ③ 魚礁

図-1はこれらの幾つかの概念図を示したものである。



図ー1 半円形ケーソンの活用概念図

3. 水理特性と設計波力の算定法¹⁾

3.1 消波特性

不規則波を用いて反射率や伝達率に関する実験を行った。基本型の反射率は直立壁の反射率よりやや小さい程度にすぎない。伝達率は天端高が $0.6H_{1/3}$ のとき 0.4程度であり、天端高 $0.6H_{1/3}$ の直立壁と同程度の伝達率となる基本型の天端高は $(1.0 \sim 1.2)H_{1/3}$ である。一方、消波型の反射率は通常の消波ケーソンと同様な特性を有し、前半分の開口率 ε_f を 0.2としたとき、極小反射率は 0.3程度となる。また、天端高 $0.6H_{1/3}$ の直立壁と同じ伝達率となる消波型の天端高は $0.8H_{1/3}$ 程度である。透過型では、前半分の開口率と後半分の開口率を適切に選定することによって、反射率と伝達率を適度に小さくすることができる。

3.2 波力特性および設計波力の算定法

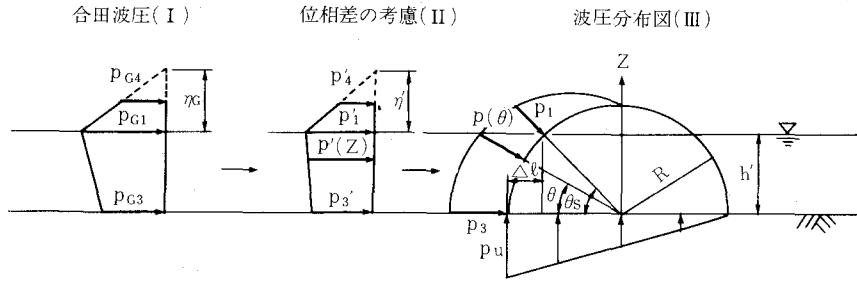
(1) 波力の特性

規則波実験により、半円形ケーソンに働く波圧や全波力を測定した。波力特性の主要な点は次のとおりである。

- ① 半円形ケーソンに働く波圧は円周面上での各位置、および底版とでピークの発生に位相差があり、同時に最大とならない。この位相差は周期が短いほど大きい。また、波の峰のときの円周面外側に作用する波圧合力の水平成分は同じ天端高さの直立壁に働く合田式による波力より小さく、かつ鉛直成分は底面に作用する揚圧力を打ち消す方向に働く。
- ② 消波型、透過型（背面の孔を静水面下にのみ設けた場合）では、条件によってケーソン内部に衝撃圧が発生する。これは前面開口部を波面が覆った瞬間に、内部に閉じ込められた空気が圧縮されることによるもので、上床版を有した直立消波ケーソンの場合と同様な現象であり、ケーソン内部全体にほぼ同時にピークが生じる。

以上の波力特性に基づき、不透過な直立壁に作用する波圧分布（合田式による）に、位相および壁面の傾きの効果を考慮した半円形ケーソンの外周面に作用する波圧分布の算定法、および上床版を有する直立消波ケーソンの遊水室に発生する空気圧縮による衝撃圧の推定理論モデルを準用した内部における波圧分布の推定法を提案した。以下、細部の算定式は複雑になるので、その考え方を中心に述べる。

(2) 半円形ケーソン外周面に働く設計波圧分布



図一2 半円形ケーソン外周面に働く設計波圧分布

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、図一2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作用地点の仰角である。こうした波圧分布は時々刻々変化するが、設計では揚圧力が最大となるタイミングと水平力が最大となるタイミングの2種の分布を考える。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。

図一2の分布(Ⅰ)はその合田式による前面波圧分布で、代表波圧強度などは添字Gを付けて表す。ただし、消波型、透過型に対しては、合田式による波圧をそのまま用いるのではなく、波圧係数 λ_p を0とするほか、揚圧力最大時につい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)に示す分布を考えるが、これは円周面の各位置で位相差が有ることを考慮して(Ⅰ)の分布を修正したもので、揚圧力最大時と水平力最大時にわけて、次のように与える。

① 揚圧力最大時

$$\eta' = \lambda_p \eta_G, \quad p_1' = \lambda_p p_{G1}, \quad p_3' = p_{G3} \quad (1)$$

② 水平力最大時

$$\eta' = \eta_G, \quad p_1' = p_{G1}, \quad p_3' = \lambda_p p_{G3} \quad (2)$$

$$\text{ここに、} \quad \lambda_p = \cos^4(2\pi \Delta l / L) \quad (3)$$

Δl : 曲面下端と曲面の静水面との交点の間の水平距離

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。

$$p(\theta) = p'(z) \cos^2 \theta \quad (4)$$

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。

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

① 揚圧力最大時

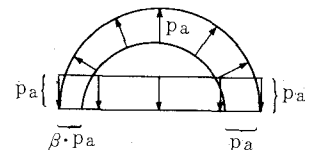
$$p_u = p_{Gu} \quad (5)$$

② 水平力最大時

$$p_u = \lambda_p p_{Gu} \quad (6)$$

(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一3に示するような分布とし、(2)の水平波力最大時に対してのみ同時に作用するものとする。図中の β 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算定するが、計算方法は省略する(直立消波ケーソンの場合の計算法は文献2)参照)。



図一3 空気圧縮衝撃圧の分布

(4) 部材の設計に用いる波力

基本型については水平力最大時の波圧分布のほか、波の谷の状態として前面水位が設計波高の $1/2$ だけ低下したときの水压分布を考える。

消波型、透過型では次の3種の状態を考える。

- ① 外周面に揚圧力最大時の波圧が作用し、かつケーソン内部の水がすべて排水されて空の状態。
- ② ケーソン内部および前面が完全に露出して背面からの水圧を受ける状態。
- ③ 水平力最大時の外周面に働く波圧と内部の空気圧縮衝撃圧が同時に作用している状態。

4. 軟着底式防波堤としての試設計例

4.1 試設計の条件

軟着底式防波堤が検討されている熊本新港を対象として、半円形ケーソン消波型の試設計例を示す。当該地点は潮位差が大きく、干潮時には干潟となることと、地盤が軟弱でかつその層が厚いことに特徴がある。防波堤は捨石マウンドを設けてその上にケーソンを据付けるのが一般的であるが、ここでは運輸省第四港湾建設局で検討されている形式³⁾に倣って、粘性土地盤上にケーソンを直接設置する形式とする。対象とした設計条件は以下のとおりである。

(1) 海象

潮位	H.W.L	+4.50 (m)	沖波有義波高	$H_0' = 1.89$ (m)
	L.W.L	±0.00 (m)	有義波周期	$T_{1/3} = 4.90$ (s)
設置水深		-1.00 (m)	堤前有義波高(H.W.L.)	$H_{1/3} = 1.37$ (m)
海底勾配		1/100	入射角(補正後)	$\beta = 49$ (度)

(2) ケーソン諸元

天端高(H.W.L+0.8 $H_{1/3}$)	+5.60 (m)	開口の頂部	+5.10 (m)
前面開口率	0.1	部材厚	0.30 (m)

(3) 土質

単位体積重量	$\gamma = 0.55$	(t/m ³)
粘着力	$C = 1.0 + 0.107 z$	(t/m ²)
体積圧縮係数	$m_v = 0.122/p^{0.993}$	(cm ² /kg)
圧密係数	$c_v = 150$	(cm ² /day)
粘土層の深さ	-40	(m)

ここに、 z は海底表面からの深さ、 p は平均圧密応力度である。

4.2 設計方法

(1) 波圧

3.で述べた方法による。ただし、揚圧力は底版が粘性土地盤に密着するものとして、作用しないと仮定する。

(2) 滑動抵抗力

底版と地盤との付着力が水平波力に抵抗する。付着力は地盤表面の粘着力と同一とし、付着面積は底版の面積に等しいと仮定する。

(3) 地盤の許容支持力

Vaughan他⁴⁾による偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力式(深さ方向に強度が増加する地盤)により算定する。この算定式はこの種の条件下において適合度のよいことが報告⁵⁾されている。

(4) 部材計算

部材計算は終局限界状態に対し行い、断面力の計算には骨組み構造解析プログラムを用いる。

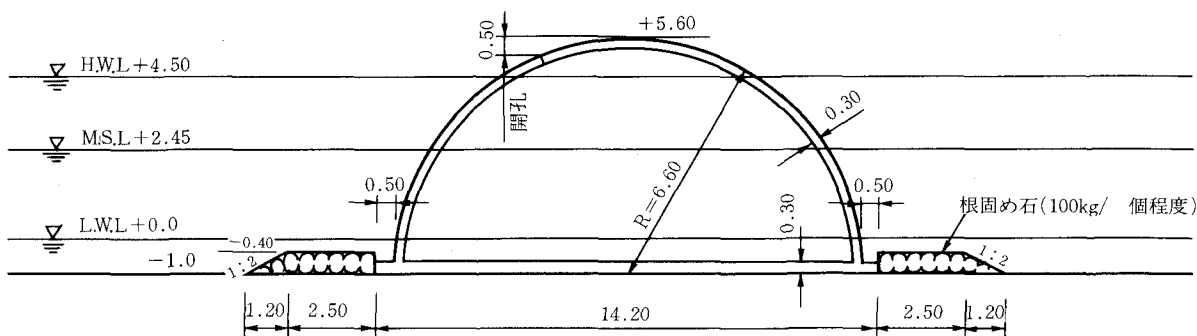
4.3 計算結果

(1) 防波堤の断面

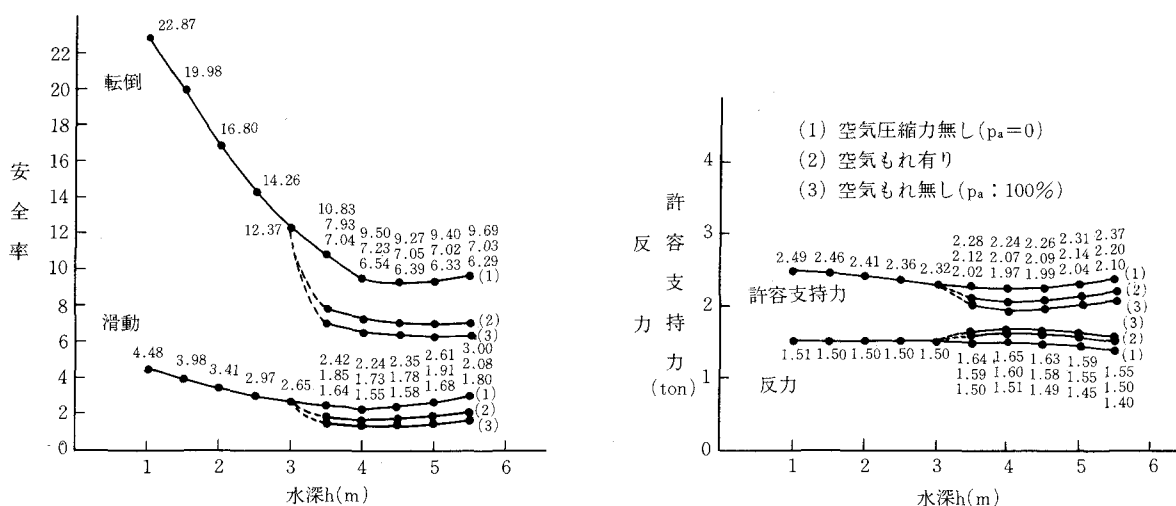
防波堤の断面を図-4に示す。ケーソンは水張りのままで、その空中重量 W は24.15t/mである。

(2) 安定性

当該地点は潮位差が大きく、潮位を±0.0mから4.5mの範囲で変化させて安定性の検討を行った。その際、設計計算に用いる最高波高は不規則波の碎波変形理論によって求めた。図-5は横軸に潮位を含めた水深をとってその結果を示したもので、左の図はケーソンの滑動と転倒の安全率、右の図は地盤の許容支持力と最大反力を表している。いずれも水平力最大時の結果であるが、波力の計算は、①空気圧縮衝撃圧を無視した場合($p_a = 0$)、②空気漏れを考慮した場合、③空気漏れを無視した場合($p_a: 100\%$)の3条件について行ってみた。水深3m(潮位2mに相当)程度までは波高が小さく、開孔



図一四 軟着底式半円形ケーソン防波堤の断面（単位：m）



図一五 安定計算の結果

部が一部開放のままであるので、空気圧縮衝撃圧は発生しない。水深3m程度以上で（１）、（２）、（３）と枝分かれているのがこの衝撃圧の扱いの違いによるものである。これらの結果から次の点が指摘される。

- ① 半円形ケーソンの転倒に対する安全率は充分に大きく、安定性は滑動の安全率で決まる。滑動の安全率は水深が 4.0 m（潮位+3.0m）のとき最小で、空気圧縮衝撃圧を100%考慮した場合でも1.55と水張りのままで充分安全である。空気圧縮衝撃圧 p_a は空気漏れを考慮しない場合でも 1.1 t/m^2 、考慮した場合には 0.7 t/m^2 程度である。
- ② 地盤反力や許容支持力は潮位によってそれほど大きく変化しない。この地盤反力（端し圧）は空気漏れを考慮しない場合であっても最大 1.65 t/m^2 で、従来の直立壁体と比較して非常に小さくなる。一方、許容支持力 q_a は最小でも 1.97 t/m^2 であり、また円形すべりの安全率も充分大きく、強度増加のための地盤改良は不要である。

（３） 防波堤の圧密沈下

平均潮位のときの静穏時荷重 1.25 t/m^2 に対し、粘性土地盤を改良しない場合の圧密沈下量を計算した。その結果、最終沈下量は52 cmである。圧密に要する時間は80%圧密で40年、90%圧密で60年になる。したがって、圧密沈下の影響は大きくないと考えられる。

（４） 部材

部材はすべてRCで、主鉄筋は複鉄筋とし、D25を10 cm間隔に配置すればよい（かぶりは10 cm）。

4.4 施工手順

施工の手順は種々考えられるが、本例の場合のその一つを示すと以下のとおりである。

- ① 堤体を寝かせた状態で適当な長さのユニットを製作する。養生後、回転台でユニットを起こす。
- ② ユニットのクレーンで連結ヤードへ運搬する。数ユニットをP C鋼材で連結して一体のブロックとする。
- ③ 数ブロックを台船に載せて曳航し、沖合で待機する。
- ④ 満潮時をねらい、台船とクレーン船を据付け地点に進入させる。ブロックをクレーン船で据付ける。
- ⑤ 根固め石はブロックと同様に満潮時をねらい投入し均す。

数ユニットを連結したブロックの規模は、使用するクレーン船の能力に合わせて決定すればよい。本例の場合6ユニットを連結して、クレーン船は500トン吊り級を用いるのが適当であろう。なお、ユニット、ブロックの吊込み作業には、吊金具その他を使用して、部材に過度な応力が生じないようにする必要がある。

5. むすび

以上、半円形ケーソンの水理特性と軟着底式防波堤としての試設計例を示した。これらの結果から、半円形ケーソンは地盤反力が小さく、軟弱地盤に対し適用性の高い構造形式であるといえる。また、耐波安定性に優れていることなどから、離岸堤などの沿岸施設への活用、さらには流体抵抗が小さいことから潜水構造物としての活用も期待される。これらについては、半円形ケーソンの改良型の追求とともに、昭和62年度にさらに検討を継続していく予定である。

なお、半円形防波堤共同研究グループには著者らのほか、澤畑 誠氏、堺 和彦氏、中村俊昭氏、古賀尚広氏、舟田邦雄氏が所属し、ここで述べることのできなかった種々の問題を検討して頂いた。また、昭和60年度には吉本靖俊氏（前運輸省港湾技術研究所）、田川昌宏氏（前（財）沿岸開発技術研究センター）が共同研究に参加した。これら協力頂いた諸氏ならびに貴重な資料を提供頂いた運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所の方々に対し心から謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・滑川伸孝・石丸敬純：半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力、第34回海岸工学講演会論文集、1987（投稿中）。
- 2) 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（第2報）、港湾技術研究所報告書、第23巻第2号、1984。
- 3) 成瀬 進：軟弱地盤着底式防波堤の開発について、第3回港湾技術報告会概要、1986。
- 4) Vaughan P. R. et al. : Stability Analysis of Large Gravity Structures, Boss'76。
- 5) 木原 力・中井 修・成瀬 進・吉本靖俊・池田 薫：軟弱地盤着底式防波堤の現地実証実験について、第12回海洋開発シンポジウム、1987。