

半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力 (その 2)

谷本勝利*・滑川伸孝**・関本恒浩***

1. ま え が き

半円形断面の構造には、底版に働く揚圧力を除けば、偏心力が発生しないという特長がある。また、波の峰の時には波力が斜め下向きに作用するため、耐波安定性がよいという利点を有する。筆者らは、この優れた特性に着目し、半円形断面を取り入れた防波堤(写真-1)の開発に取り組み、既に完全な半円形のケーソンをマウンドなしで、海底に直接設置した形式を対象として、その水理特性や設計波力の算定法を検討した^{1),2)}。その結果、作用波力については、通常の直立ケーソンに比較して相当程度小さくなることが明らかとなった。ただし、実際の適用を考える場合、直立ケーソンに比べ越波しやすく、背後への伝達率が大きくなることや、底面幅が高さの2倍となるため、水深が深くなると幅広い断面となり、特に底版に働く揚圧力が大きくなるなどの難点があった。

本研究は、これらの難点を緩和する実用的な構造の開発を目標として実施したもので、マウンドの上に据付ける混成堤形式を対象として、堤体をコンパクト化する方策や伝達波、揚圧力の軽減方策を実験的に検討し、さらに前報で提案した設計波力の算定法を不完全な半円形ケーソンにも適用できるように発展させることを目的としたものである。

2. 実験方法および実験条件

実験に用いた水路は全長 163 m、幅 1 m、深さ 1.5 m の不規則波長水路である。堤体模型の設置位置は造波板から 143.8 m の地点で、1/50 勾配の斜面上とした。堤体は、その一般図を図-1 に示しているように、捨石マウンドの上にケーソンを設置した混成堤形式である。ケーソンはコンパクト化を図るため半円形の下に直立部を設けた複合断面で、さらに頂部に上部工を設けた構造なども対象とした。以下、これらを総称して半円形ケー

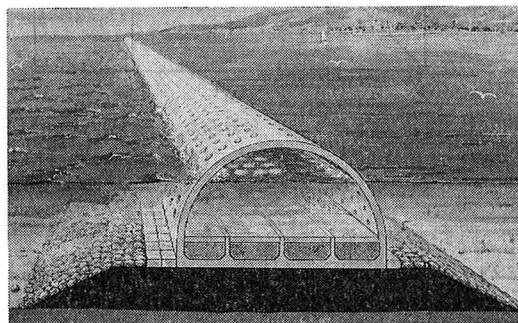


写真-1 半円形防波堤のアーチストイメージ

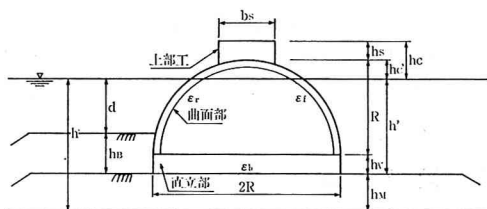


図-1 半円形ケーソン堤模型一般図

ソンと呼ぶ。模型はモルタル(滑動面)および鋼板製の底版(直立部)にアクリル樹脂製の曲面部(外寸半径 $R=25\text{ cm}$)を固定したものである。

半円形ケーソンは前後の曲面壁の孔の開け方によって様々なバリエーションが選べる。前半分の曲面壁の開口率 ε_r が 0 のものを基本型、前半分に孔があって後半分の開口率 ε_r が 0 のものを消波型、両曲面壁に孔のあるものを透過型と呼ぶ。本論文では、これらのうち基本型のみを扱う。

伝達波の軽減策については、後半分に孔を開ける構造、揚圧力の軽減策については、底版に孔を開ける構造(開口率 ε_b)を検討した。表-1 にこれらの構造条件の一覧を、同時に実験した消波型、透過型も含めて示す。表中、 h_v は下部直立部の高さ、 h_s は頂点からの上部工の高さである。このほか、構造条件としてはマウンドの厚さ h_m および前肩幅はそれぞれ 10 cm、32 cm で一定とし、前面のマウンド被覆材の厚さ h_b は 10.7 cm を標準として、ケーソンの構造条件を限って、0 cm、6.7

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部

** 正会員 工修 (前)(財)沿岸開発技術研究センター

*** 正会員 工修 半円形防波堤共同研究グループ

表-1 構造条件一覧表

	h_f	h_b	ε_f	ε_r	ε_b	
I	5	0	0	0	0	基本型①
II	5	0	0	0.25	0	基本型②
III	5	0	0	0.25	0.05	基本型③
IV	5	0	0	0.25	0.10	基本型④
V	5	0	0	0.25	0.20	基本型⑤
VI	10	0	0	0.25	0.20	基本型⑥
VII	5	5	0	0.25	0.20	基本型⑦
VIII	5	0	0.25	0	0	消波型①
IX	5	5	0.25	0	0	消波型②
X	5	0	0.25	0.05	0	透過型①
XI	5	0	0.25	0.05	0.20	透過型②
XII	5	5	0.25	0.05	0.20	透過型③

cm に変化させた。また、水深 h は 30, 35, 40 cm の 3 条件を対象とした。

実施した実験は反射・伝達波実験、波圧実験および滑動実験の 3 種で、実験波はすべて Bretschneider・光易型を目標スペクトルとした不規則波である。このうち、反射・伝達波実験は入射波分離計算用に沖側 2 台の波高計で水位を計測するとともに、岸側 2 台の波高計で伝達波を測定したものである。実験波の有義波周期は 1.0, 1.4, 2.0, 2.6, 3.2 s の 5 種で、それぞれ 3 種の波高レベルの波を対象とした。

一方、波圧実験は最大 15 個の超小型波圧計を用いて波圧を測定したものである。実験波の有義波周期は 1.4, 2.6, 3.2 s の 3 種で、波列の異なる 3 種の波群について、それぞれ十分大きな波高の波を含む最大級の波高レベルを対象とした。このように波高レベルを 1 種としたのは、不規則波実験では、一つの波群で大小様々な波高による波圧が測定できることによる。滑動実験は有義波周期を 2.6 s（3 波群）の 1 種とし、堤体設置位置での入射有義波高を 15.0～25.0 cm の範囲で 5 種に変化させ、構造条件を限って防水型変位計で滑動量を測定したものである。ケーソンの重量も種々に変化させている。

3. 反射・伝達波特性

（1）反 射 率

反射・伝達波の特性については、前回の実験結果も併せて示す。実験条件等については前報²⁾を参照されたい。

図-2 は基本型（ $\varepsilon_f = \varepsilon_r = \varepsilon_b = 0$ ）の反射率 K_R を示したものである。横軸には、碎波の程度を表すパラメーターとしてマウンド被覆工天端上の水深に対する入射有義波高の比 $H_{1/3}/d$ をとっている。図中の○印は前回のマウンドのないもの、●印は今回のマウンドのあるものを表す。全体的な傾向としては、 $H_{1/3}/d$ が大きくな

るにつれて、つまり碎波の影響が顕著になるにつれて、エネルギーが消費され反射率が小さくなっている。また、マウンドがある場合には、ない場合に比べて反射率が小さい。これはマウンドによって碎波が助長されるほか、マウンドによるエネルギーの消費およびマウンド透過波があることによる。マウンド有りの場合の反射率は $H_{1/3}/d$ が 1.5 程度では 0.4 程度であり、通常の直立ケーソン式混成堤³⁾ に比べて小さい。

（2）伝 達 率

図-3 は伝達率 K_T を示したもので、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ （ h_c は静水面上天端高）を横軸にとってプロットしてある。これより、 $K_T = 0.2$ となる相対天端高は、マウンドがない場合で 1.2, ある場合で 1.0 程度である。これに対する通常の混成堤の相対天端高が 0.6 程度であるので、ほぼ同じ伝達率とするためには天端高を高くしなければならない。

そこで、比較的低天端であっても伝達率を抑えられないかということが課題となる。これに関し、運輸省第一港湾建設局が上部斜面ケーソンに対して考えた背後での消波が思い出される。これは越波伝達波が越波による打ち込みエネルギーによって生成されるのであるから、そのエネルギーを消費する機構を背面に持てば伝達波を小さくすることができるという考えに基づく。そのため、背後に消波ケーソンと同じような透過壁と遊水室を有する消波機構を設けたものであった。同様な考え方を当該

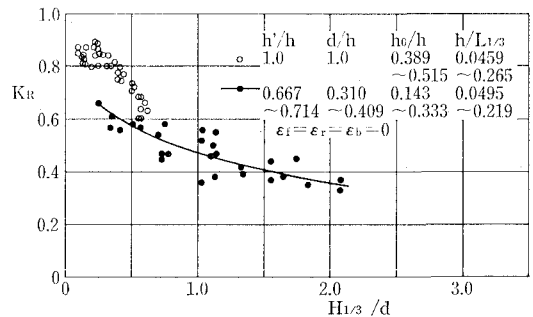


図-2 基本型の反射率

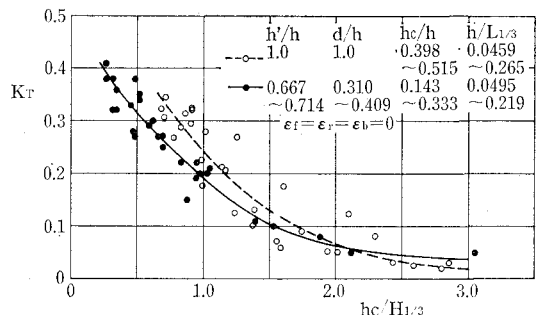


図-3 基本型の伝達率

構造に適用すると、背面に孔を開けて越波による勢力を減じれば伝達波を減じることができるのではないかというアイデアは容易に浮かぶ。

図-4 は後半分に孔を開けた場合(構造条件II: $\varepsilon_r = 0.25$)の伝達率を孔を開けない場合(構造条件I)と対比して示したものである。他の条件は全く同じである。これによると、後半分に孔を開けることによって伝達率は明らかに小さくなっている。特に、相対天端高が0.5程度以上のとき効果が大きく、 $hc/H_{1/3} = 0.8$ 程度では伝達率は孔のないものに比べ50%程度に小さくなっている。不透過型の場合、後述するように耐波安定性がよく、半円形内部全体を中詰めする必要のないことが多いから、背面消波の形式とするのがよいと言える。なお、ここでは示していないが、反射率や伝達率への直立部の高さや上部工の影響は顕著でない。

4. 波力特性

(1) 揚圧力の低減

揚圧力低減方策として、底版(直立部)の開口率 ε_b を0, 0.05, 0.10, 0.20(表-1の構造条件II~V)に変化させて波圧を測定した。孔は底版の前および後半部に一様にスリット状に開けたもので、半円部の内部に連通している。さらに、背面曲面壁にも孔($\varepsilon_r = 0.25$)が開いているので、底版の下の水は半円形内部(遊水室)およびケーソン背後へ流れることができる。これによって底版に働く揚圧力を減じることができないかと考えたものである。

図-5 は底版前半分中央での波圧波形を $\varepsilon_b = 0$ と0.20の条件に対し例示したものである。それぞれ、上から底版(直立部)の下面、上面での波圧、およびその差圧(上向きを正)の時間変化である。 $\varepsilon_b = 0$ であっても、上面には越波打ち込みによって背後曲面壁の孔からの擾乱が作用するので、圧力が変動しているが、その程度は下面に働く波圧に比べて小さい。これに対し、 $\varepsilon_b = 0.20$ の条件では、下面に働く波圧が著しく減少し、差圧はほとんど0に近くなる。これは前述したように底版の下の水は遊水室、さらにケーソン背後へと連通しており、波の作用によってその系統での全体としては弱い流れが発生し、底版にはそうした流れによる弱い圧力しか作用しないことによると考えられる。

図-6 は半円形ケーソンに働く水平波力が正(岸方向)のピークとなるときの底版下面および上面で波圧の代表値(最大値, 1/10最大平均値, 1/3最大平均値)をそれぞれ対応する入射波の代表波高(最高波高, 1/10最大平均波高, 有義波高)に対しプロットしたものである。

下面では ε_b が大きくなるにつれて小さく、上面ではやや大きくなる傾向が読み取れる。ここには示していない

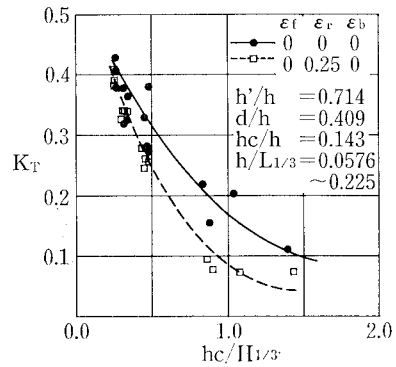


図-4 背面孔による伝達率低減効果

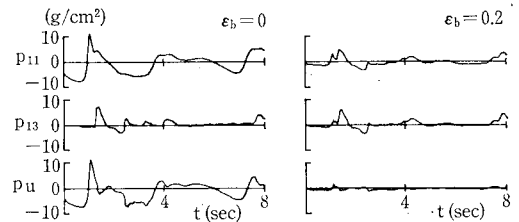


図-5 底版に働く波圧の時間変化の例

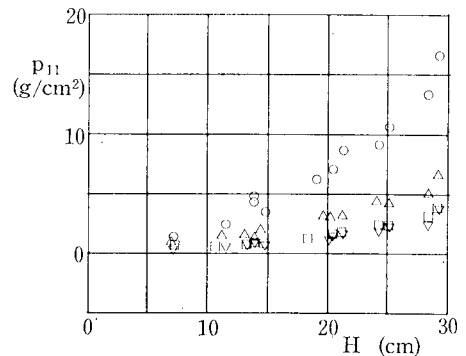


図-6(a) 底版下面に働く波圧(記号は(b)と同じ)

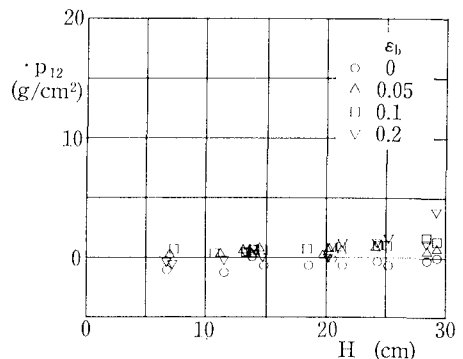


図-6(b) 底版上面に働く波圧

けれども、 ε_b が0.1以上では差圧はほとんど0と考えてよい。

(2) マウンド被覆厚さの影響

通常の混成堤では、高マウンド化するにつれて異常に大きい衝撃碎波力が作用する。そのため、水深の比較的浅い碎波帯でかつ波を直角に受けるような場合には通常の混成堤は現実的に成り立たない。しかし、斜面ケーソンなどの異形ケーソンでは、そのような場合であっても波力の異常増大を避けることができる⁴⁾。半円形ケーソンも波力を直立の一面で受ける構造ではないので、斜面ケーソンと同様に強大な衝撃碎波力の作用を避け得るものと期待される。これを検証するため、構造条件Ⅴを対象としてマウンドの被覆厚さを変え、 d/h で 0.31~0.67 の範囲で波圧を測定した。

図-7 はその結果による代表波高と水平波力の代表値の関係をプロットしたものである。ただし、水平波力はケーソンの全高で割って平均波力強度 f_H の形にしてある。波力は d/h の違い (図中の被覆厚さ h_B の違い) にかかわらずほぼ同程度で、通常のケーソンの場合のように異常増大のないことが確認される。ちなみに、 $h_B=0$ の状態を基準として、合田式で計算される p_1 (静水面での波圧強度) の値どうしを比較してみると、 $h_B=6.7$ cm のとき約 1.4 倍、 $h_B=10.7$ cm のとき約 1.7 倍にもなる。すなわち、波圧係数 α_2 の影響が顕著なわけであるが、半円形ケーソンではこれを考慮する必要はない。

(3) 波圧分布の例

図-8 は波圧分布の一例を上部工がない場合 (構造条件Ⅱ) およびある場合 (構造条件Ⅲ) について示したもので、水平波力が正のピークとなる瞬間の各測点での波圧値の 1/3 最大平均値を代表値にとっており、曲面部は水平に投影した鉛直面としてある。図中の実線の波圧分布は後述の算定法に有義波高を入れた場合のものであるが、実験値とほぼ一致している (有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.4 s)。波圧は上部工の有無によって異なり、ありの場合には上部工へ強い波圧が働くことになり、半円形ケーソンの特長が損なわれる。ただし、これについては上部工前面を傾斜面とするなどの対応が考えられる。

5. 設計波力の算定法と滑動安定性

本研究により得られた知見をもとに、前報で提案した波力算定法をマウンドがある場合等にも適用できるように一部修正して発展させた。

波力算定法は基本的には前報の考え方と同じである。つまり、図-9 に示しているように、通常の直立壁に働く合田式による前面波圧分布 (Ⅰ) に、円周面各位置でのピーク値の発生位相差を考慮して中間的に (Ⅱ) の分布を考え、さらにこれに傾きの効果を考慮して、最終的な波圧分布 (Ⅲ) を求めるものである。マウンドの影響や直立部あるいは上部工のある場合を含めて、基本型

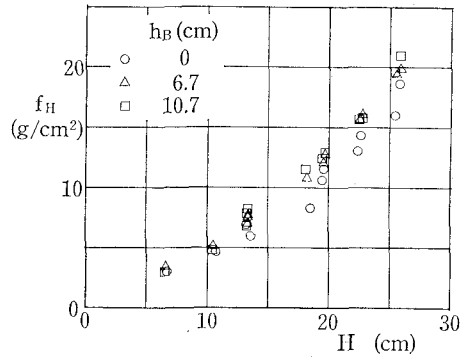


図-7 波高と水平波力強度の関係

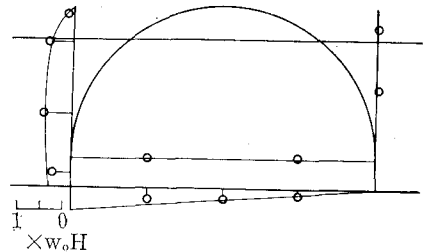


図-8(a) 上部工がない場合の波圧分布の例

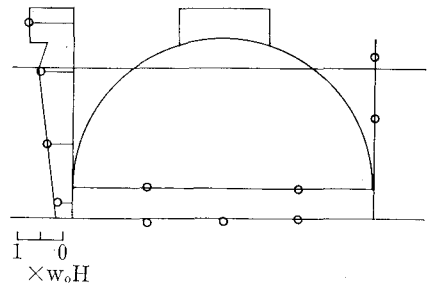


図-8(b) 上部工がある場合の波圧分布の例

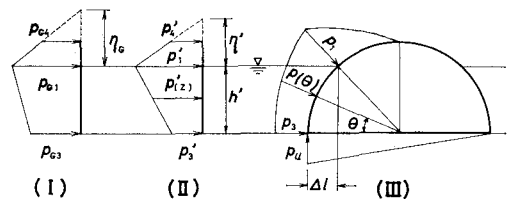


図-9 半円形ケーソンに働く設計波圧分布

に対し今回発展させた前報との相違点は以下のとおりである。

- ① 安定計算に用いる波力の位相は、波の峰に対して水平波力最大時のみを考慮すればよい。
- ② (Ⅰ) の波圧分布において、合田式の波圧係数 α_2 は 0 とする。
- ③ (Ⅱ) の波圧分布における位相差補正係数 λ_p (すな

わち $p_s' = \lambda_p p_{Gs}$ は前報と同じ式(1)を用いるが、上部工がある場合の Δl は曲面部下端と上部工前面の間の水平距離にとる。また、半円形部の下に直立部があってもその下端での p_s' を同様に与える。

$$\lambda_p = \cos^4(2\pi \Delta l / L) \quad \dots\dots\dots (1)$$

- ④ (Ⅲ)の分布における傾き補正は式(2)のように前報と同じとするが、べき数 n の値を改める。

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

ここに、 $n=1$: 上部工がない場合

$n=0$: 上部工がある場合

なお、直立部に対しては $\theta=0$ として計算すればよい。

- ⑤ 上部工に作用する波力は、合田式により求まる上部工部分での波力に割増し係数2.0を乗じて求める。

- ⑥ 背面曲面壁に孔が開いていて、底版の開口率 ε_b が0.1以上であれば、底版に働く揚圧力は無視してよい。

図-10は、式(3)で与えられる滑動合成波力強度 f_s について、提案した波力算定法による計算曲線と実験による代表値を比較した例である。

$$f_s = (F_H - \mu F_V) / (R + h_s + h_V) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 F_H : 単位長さあたりの水平波力、 F_V : 同鉛直波力、 μ : 摩擦係数(=0.6)である。算定法はほぼ妥当な波力を推定している。

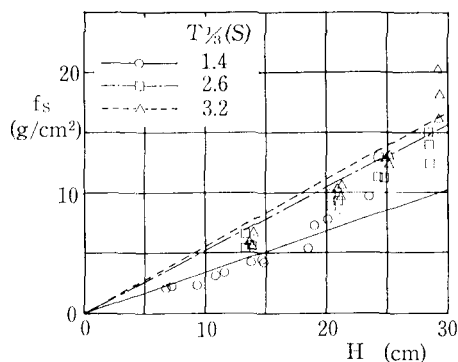


図-10 波高と滑動波力強度の関係

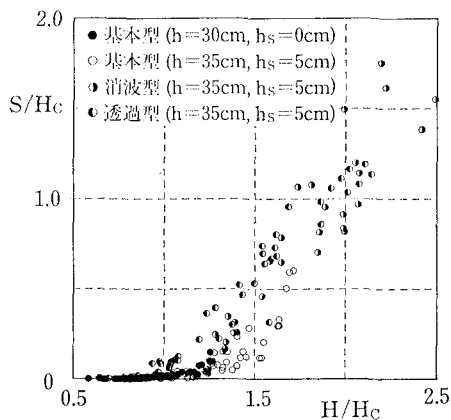


図-11 滑動実験結果

図-11は滑動実験の結果を整理したものである。横軸は実験波の最高波高、縦軸は約250波の不規則波の作用による滑動量 S をそれぞれ提案した波力算定法による滑動限界波高 H_c で割って無次元化してある。構造条件は基本型のVとⅦのほか、ここでは算定法を示していないけれども、消波型のIX、透過型のⅫに対する結果も併せて示してある。 H/H_c が1.0を上回る条件は限界波高を超える波が来襲したことに相当する。各構造ともほぼ1.0あるいはややそれを上回るところから滑動が生じており、提案法が妥当であることを例証している。特に、基本型は限界波高の1.2倍の波が作用しても、滑動量は0.1 H_c 程度以下で耐波安定性がよい構造と言える。

6. む す び

前報に続き、半円形防波堤の消波性能の向上、ケーソンのコンパクト化を主眼とした研究を行って、本論文では基本型について水理特性を明らかにするとともに、設計波力の算定法をマウンドの影響や直立部を有した複合構造および上部工がある場合も含めた一般的なものに発展せしめた。

基本型の場合、背面に孔を開けることによって伝達率を低減できるとともに、さらに底版に孔を開けることによって揚圧力を低減できる。また、通常の矩形のケーソン式混成堤の場合、強大な衝撃碎波力が発生する条件であっても、半円形ケーソン堤ではそのおそれがない。そのため、前面のマウンドの被覆ブロックを厚くすることによって反射率を小さくできるので、水深のやや大きいところでの離岸堤構造として実用化の可能性が高いと考えられる。ここで述べることのできなかった消波型、透過型の水理特性および設計波力の算定法については、機会をみて続報として発表することにしたい。

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、ビー・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。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・奥村樹郎・滑川伸孝・橋詰文伯・石丸敦純: 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) 谷本勝利・吉本靖俊・滑川伸孝・石丸敦純: 半円形ケーソンの水理特性と設計波力, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 551~555, 1987.
- 3) 谷本勝利・高橋重雄・木村克俊: 防波堤の構造と水理特性(英文), 港湾技術研究所報告, 第26巻第5号, pp. 12~55, 1987.
- 4) 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, 港湾技術研究所報告, 第20巻第2号, pp. 3~39, 1981.