

消波型・透過型の半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力

滑川 伸孝*・谷本 勝利**・関本 恒浩***・高橋 重雄****

1. ま え が き

半円形断面構造に作用する波力は、その水平成分が減少し、鉛直下向き成分が滑動抵抗に寄与することから耐波安定性が良く、堤体の軽量化を図ることができる。また波力が円の中心に向かうので偏心力が発生しないことから地盤反力を均一化でき、その値も小さくできる。著者らは、この優れた特性に着目し、まず、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、水理模型実験によりその水理特性と設計波力の算定法を検討した(谷本ら, 1987)。このときの実験を第Ⅰ期実験と呼ぶ。次に、水深がある程度深くても底面幅を適切な大きさに調整できるように、半円形部の下に直立部を設けた模型をマウンドに設置した混成堤型式の水理実験を行った。この実験を第Ⅱ期実験と呼ぶが、第Ⅱ期実験結果のうち曲面壁前半分に開口部がない基本型について、その水理特性を検討し、設計波力の算定法を提案している(谷本ら, 1988)。

最近、静穏度確保という機能以外に、景観、低反射性、海水交換機能なども防波堤に求められてきている。これらの要請を満たす半円形ケーソン堤として前面や背面に開口部を有し、波エネルギーを逸散させる消波型と、透過も許す透過型がある。

本研究は、直立部とマウンドを有する一般的で、経済的な消波型や透過型半円形ケーソン堤の現地での建設の実現に向け、種々の構造条件について水理特性を明らかにし、設計波力算定法を確立することを目的としている。

2. 実験方法および実験条件

水理模型実験は、全長 163 m, 幅 1 m, 深さ 1.5 m の造波水路内に、前肩幅 32 cm で厚さ 10 cm のマウンドを築造し、半径 (R) 25 cm の堤体模型を設置して行った。このときの沖側マウンド被覆材の厚さ h_B は 10.7 cm である。実験波は、有義波周期 1.0~3.2 秒, 有義波高 3 cm~

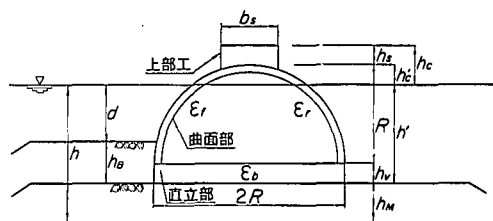


図-1 半円形ケーソン堤体模型一般図

20 cm の一方向不規則波を用い、水深 (h) は 30 cm, 35 cm, 40 cm である。実験の種類は、反射・伝達波実験、波圧実験、滑動実験であり、容量式波高計、超小型式波圧計、変位計を用いて波高、波圧、滑動量を測定している。消波型の堤体模型の曲面壁前半分に開口率 $\epsilon_f = 25\%$ の開口部を設け、透過型には後半分にも開口率 $\epsilon_r = 5\%$ の開口部を設けている。透過型には底版に開口率 $\epsilon_b = 20\%$ の開口部を設けたものもある。半円形部の下部には高さ (h_v) 5 cm の直立部を設け、上部には高さ (h_s) 5 cm の上部工を設けたものと、設けないものの 2 種類としている。堤体模型の一般図を図-1 に示す。

3. 反射・伝達波特性

3.1 消波型の反射・伝達波特性

消波型の反射・伝達特性は基本型の場合の主因子である $H_{1/3}/d$ や $h_c/H_{1/3}$ のほか、前面開口率や遊水室幅などによって変化する。図-2 は横軸に相対遊水室幅 $b_0/L_{1/3}$ をとって反射率 K_R を示したものである。ここに、 b_0 は静水面におけるケーソンの外縁幅、 $L_{1/3}$ は有義波の波長である。□, ○, △印は第Ⅰ期実験、すなわちマウンドのない状態での ϵ_f が 0.30, 0.20, 0.10 の結果を示しているが、 $\epsilon_f = 0.20$ で $b_0/L_{1/3} = 0.10$ のとき、最小反射率 0.3 程度となっている。+印はマウンドを設けた第Ⅱ期の実験結果を示している。反射率は全体に小さく 0.4 程度以下である。これは低天端で越波が多いことにもよるが、 d/h が 0.310~0.409 と小さく、マウンド上での碎波による消波効果が大きいものと推測される。

一方、図-3 は伝達率を示したものである。第Ⅰ期の実験では、伝達率は前面開口率 ϵ_f が大きいほど小さくなる

* 正会員 工修 (株)日本港湾コンサルタント 設計本部第七グループ

** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

*** 正会員 工修 半円形防波堤共同研究グループ

**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長

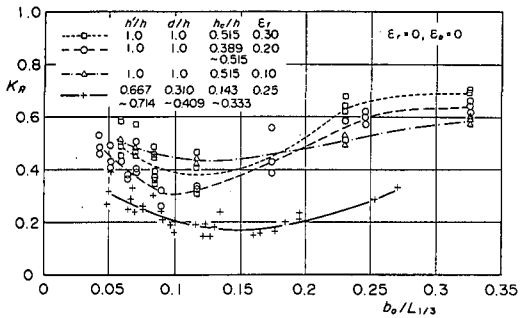


図-2 消波型の反射率

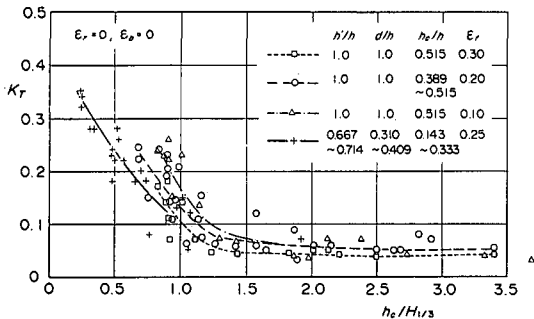


図-3 消波型の伝達率

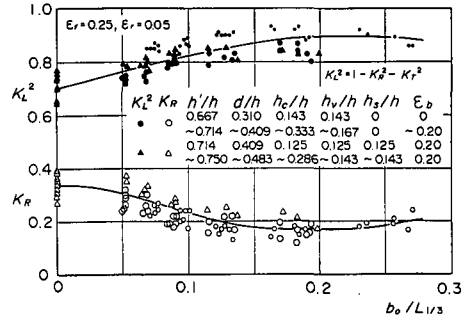


図-4 透過型のエネルギー消費率と反射率 (マウンドあり)

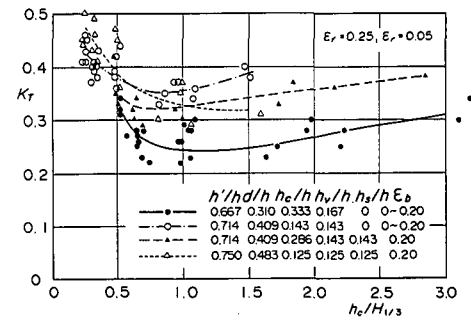


図-5 透過型の波高伝達率 (マウンドあり)

傾向にある。第II期の結果はばらつきが大きいけれども、伝達率はやや小さい。 $K_T=0.2$ となる相対天端高は、マウンドがない場合で $\epsilon_f=0.1$ のとき0.9程度、 $\epsilon_f=0.2\sim0.3$ のとき0.8程度である。マウンドがある場合には、 $\epsilon_f=0.25$ で0.6程度となっており、通常の混成堤とはほぼ同じである。

3.2 透過型の反射・伝達波特性

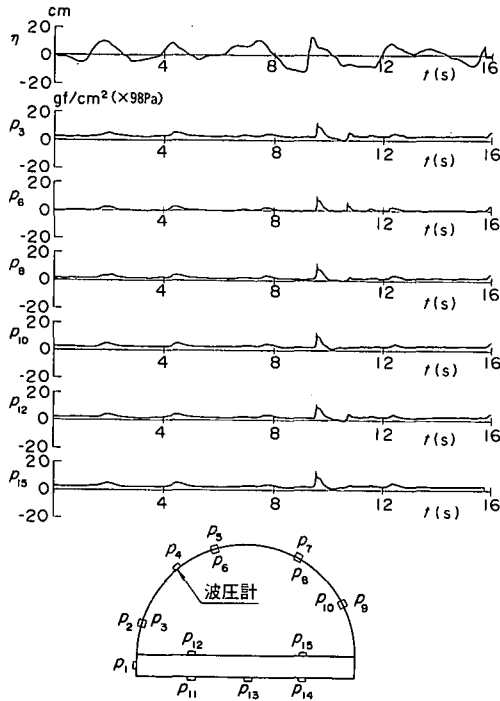
透過型は、消波型に比較して、背面開口部の影響により、反射率は小さく、伝達率は大きくなる傾向がある。背面開口率 ϵ_r を0~0.15の範囲でかえた第I期実験では、 ϵ_r が大きいほどのこの傾向が著しくなっていた。図-4、図-5は第II期実験による透過型のマウンドがある場合のエネルギー消費率、および反射・伝達率を示したものである。 $\epsilon_f=0.25$ 、 $\epsilon_r=0.05$ の条件で、上部工有り、無しの両方の結果を併せてプロットしてあるけれども、エネルギー消費率や反射率に対する上部工の有無による変化は小さい。エネルギー消費率は $b_0/L_{1/3}$ が0.1以上で0.8と大きく、この範囲で反射率は平均的に0.2程度で、0.1に近い値もあり、非常に小さい。なお、 $b_0/L_{1/3}$ が小さくなるにしたがい反射率は増大するが、最大でも0.4程度である。伝達率は構造条件によってやや異なっているが、 d/h が小さい0.310のケースが最も小さく、 d/h が0.483と大きくて $h_c/H_{1/3}<0.5$ の波高が大きい範

囲で最大になっている。このことから、マウンド上での碎波による消波効果が大きいと考えられる。

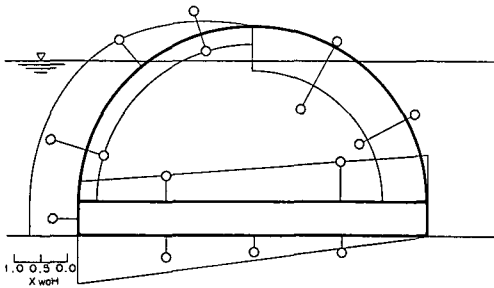
4. 消波型・透過型の波力特性

消波型・透過型の半円形外部周面に作用する波圧は、前面開口部などの影響によりその値がやや小さくなる以外は、ピークに位相差が認められ、基本型の波力特性とほぼ同じである。半円部の上に直立の上部工があると、上部工の前面に衝撃的な波圧が作用する。上部工に作用する波圧の値は、開口部の影響のため基本型より小さく、透過型は消波型より小さい。なお、このとき外周面に作用する波圧も増大する。

波力特性で基本型と大きく異なるのは内部波圧に関してである。図-6は消波型の水位(η)と内部波圧記録の一例を示したものである。このときの水深 h は35 cm、マウンドの被覆厚 h_b は10.7 cm、 $d/h=0.409$ 、 $h/h=0.714$ である。波浪条件は、 $T_{1/3}=2.6$ s、 $H_{1/3}=20$ cm、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ は0.25である。内部に作用する波圧は基本型に比べて大きな値を示している。しかし、第I期実験に認められたような空気圧縮による衝撃波力の顕著な振動は発生していない。これは第II期実験では孔を半円部の頂点にも開けており、空気が閉じ込められにくいことによると推測される。なお、透過型では背面開口部によ



図一6 消波型内部波圧の記録例
(マウンドあり, 不規則波)



図一7 消波型の波圧分布例

る影響で消波型より内部波圧が小さい。

図一7は前述の条件の波圧分布を示したもので、水平波力が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いる。背面側の内部波圧の大きさは外周面の波圧に近く、前面側の内部波圧は背面側の半分程度で、いずれも一様分布形状に近い傾向を示す。底版に作用する内部波圧も背面に近いところで大きく、前面側で小さく、その値は内周面の波圧に近い。外周面の波圧分布は、基本型と似た形状をしている。また、マウンド高が $d/h=0.409$ と小さいにもかかわらず、波圧の著しい増大がみられず、基本型と同様に衝撃砕波力は発生しないものと考えられる。図中の実線の波圧分布は、後述の算定法に有義波を用いた場合のものであるが、実

験値にほぼ対応している。

5. 設計波力の算定法

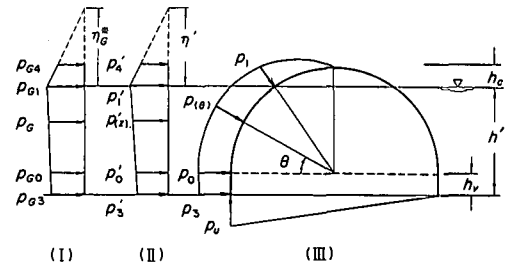
5.1 外周面の設計波圧

外周面の設計波圧については既報の基本型の考え方(谷本ら, 1988)と同じである。つまり、図一8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(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、さらにこれに曲面の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。これらの詳細については前報を参照されたい。前面側開口部による基本型との相違点を以下に示す。

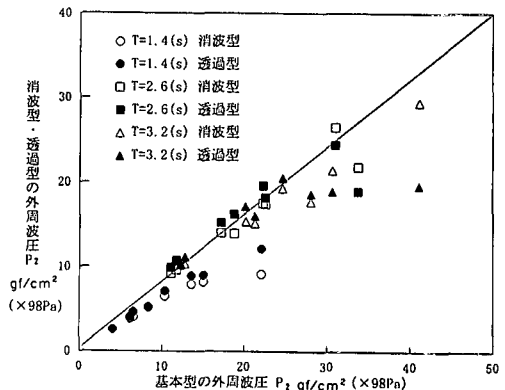
a) 前面側開口部による外周面波圧の低減係数 λ_1 として0.8の値を用いる。ただし、直立の上部工がある場合は低減させない。なおこれらの低減係数は揚圧力にも適用する。

図一9は、第II期実験(マウンド有り)で上部工がない場合の外周面に作用する波圧 P_2 (位置は図一6参照)について、横軸に基本型、縦軸に消波型、透過型の値をプロットしてその関係を示したものである。

このときの水深 h は35 cm、位相のタイミングは、滑動現象に深くかかわる水平波力最大時である。図中の直線



図一8 半円形ケーソンに働く設計波圧分布



図一9 消波型・透過型と基本型の外周波圧 (P_2)

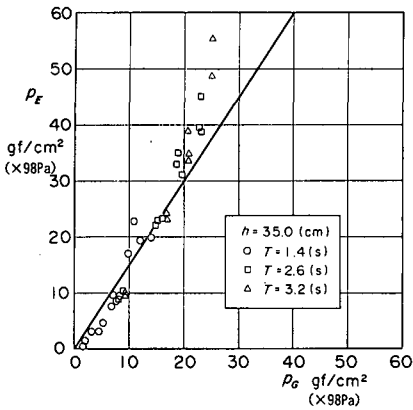


図-10 上部工に作用する波圧 (消波型)

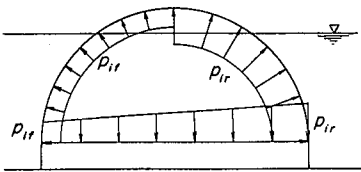


図-11 内部波圧分布

は、基本型の波圧に前述の低減係数 $\lambda_1 = 0.8$ を乗じた値を示すが、消波型・透過型の外周波圧は、ほぼこの直線で代表できる。

b) 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を乗じて求め、消波型で 1.5、透過型で 1.25 の値を用いる (基本型で 2.0)。図-10 は、消波型について、計算および実験による上部工に作用する波圧強度を比較したものである。ここに、計算による波圧強度 p_c は合田式 ($\alpha_0 = 0$) によって計算した上部工前面壁での平均波圧強度である。

図中の直線は、消波型に対して $p_e = 1.5 p_c$ の関係を示している。ここには示していないが、消波型では $p_e = 1.25 p_c$ であった。最大波力に相当する条件ではやや過小な場合もあるけれども、全体的にはほぼ平均的関係を表している。

5.2 ケーソン内部の設計波圧

a) 波圧分布

消波型や透過型においては、遊水室内部に働く波圧を考慮する必要がある。この波圧は条件によって、空気圧縮による衝撃圧であることもあるが、頂点付近に孔が開いている場合や遊水室に側壁がない場合には、一般に空気圧縮よりも大きい波圧を考える必要がある。図-11 は実験結果を考慮して設定した設計に用いる内部波圧分布を示したものである。半円形壁前半分で強度 p_{ir} 、後半

分で強度 p_{ir} の一様分布とし、底面 (底版上面) に働く波圧は前端で p_{ir} 、後端で p_{ir} の直線分布とする。曲面壁に働く波圧は現象的には頂点で不連続であるわけではないけれども、一般に後ろ側で大きく、前側でやや小さい傾向であり、簡単のため頂点を境に一様分布としている。

なお構造的に内部に空気層を閉じ込めることが明らかでない場合には、空気圧縮による衝撃圧 (谷本ら, 1987) を用いてよい。なお、波圧強度 p_{ir} , p_{er} は合田式の波圧に補正係数を乗じることによってそれぞれ次式で表す。

$$p_{ir} = \gamma_f \lambda_1 p_{c1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_{er} = \gamma_r \lambda_1 p_{c1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

b) 補正係数

図-12~14 は上部工なしの消波型や透過型に対する実験結果であり、図中の直線は式 (1) や (2) の関係

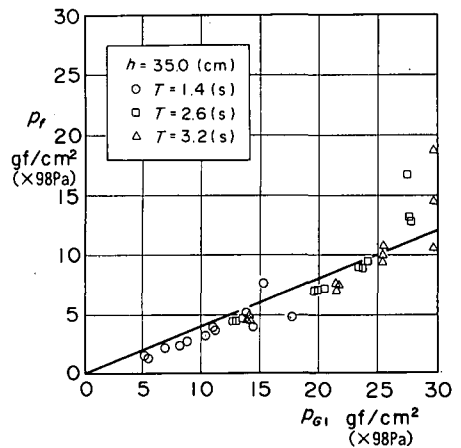


図-12 内部前半分に働く波圧 (消波型, 上部工なし)

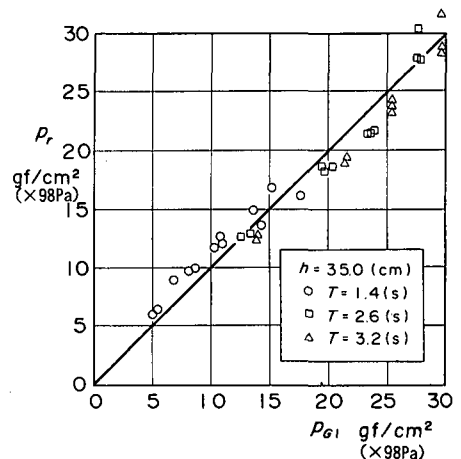
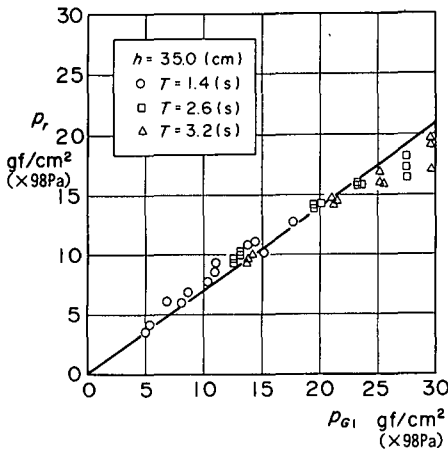
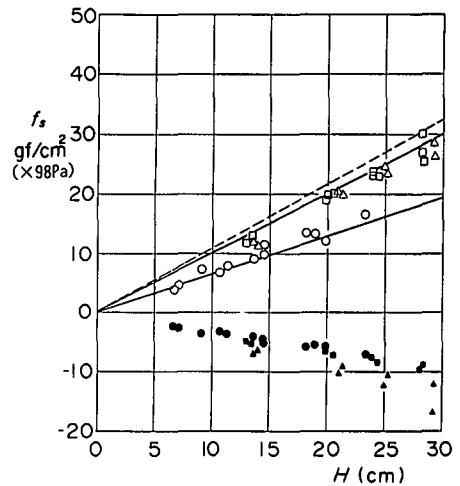


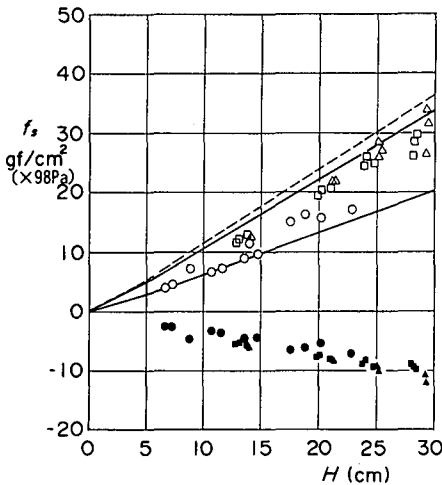
図-13 内部後半分に働く波圧 (消波型, 上部工なし)



図一14 内部後半分に働く波圧
(透過型, 上部工なし)



図一16 透過型に働く滑動合成波力強度 (上部工無)



図一15 消波型に働く滑動合成波力強度 (上部工有)

を表している。直線勾配が $\gamma_f \lambda_1$ や $\gamma_r \lambda_1$ に相当し、これらの実験結果より式 (3)~(5) で示することができる。

$$\gamma_f = \begin{cases} 0.6 \cos \theta_1 & (\text{上部工がないとき}) \\ 0.6 & (\text{上部工があるとき}) \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

$$\gamma_r = \begin{cases} 1.4 \cos \theta_1 & (\text{消波型}) \\ 1.0 \cos \theta_1 & (\text{透過型}) \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \{ (h' - h_v) / R \} \quad \dots\dots (5)$$

p_{G1} : 合田式 ($\alpha_2=0$) で与えられる静水面での波圧。

5.3 滑動安定性

図一15, 16 は式 (6) 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。

$$f_s = (F_H - \mu F_V) / (R + h_s + h_v) \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 F_H : 単位長さあたりの水平波力, F_V : 同鉛直波

力 (下向きを正), 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。

なお、消波型と透過型の滑動合成波力を基本型と比較すると、外周波圧は小さいけれども内部に弱い衝撃圧が作用するため、その値は同程度かやや大きくなる。

6. む す び

本研究で得られた知見をもとに消波型、透過型について、種々の構造条件に適用できる設計波力算定法を提案し、半円形ケーソン堤の設計が可能となった。同様な水理模型実験により導かれた基本型の波力算定式が、宮崎港における現地実証試験で検証されていることから (油谷ら, 1995), 消波型と透過型の波力算定式も信頼性が高いものと考えられる。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, 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ものに、新たな考察を加えたものである。

参 考 文 献

- 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, pp. 551-555, 1987.
- 谷本勝利・滑川伸孝・関本恒浩: 半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力 (その2), 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 662-666, 1988.
- 油谷進介・懸塚 貴・笹山 博・谷本勝利・滑川伸孝: 半円形ケーソン式防波堤の現地実証試験について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 841-845, 1995.