

重力式カーテン防波堤による波変形と作用波力に及ぼす 上・下部工の影響について

中村 孝幸* ・ 中村 文彦** ・ 川部 正司**
井上 温人*** ・ 森本 睦*** ・ 後藤 大介****

1. ま え が き

従来, カーテン防波堤は, 比較的波の静穏な内海や内湾を中心にして利用され, 一般に杭式構造で支持されることが多い。このような支持方式は比較的小水深の海域で使用されているが, 内海や内湾に面する港湾でも, 大水深となる場合も見られ, このとき杭式の支持構造を利用することはモーメント長が長くなることなどから不経済になる。また, 従来よりの重力式の混成堤では, 消波対象波から考えて過大投資になりやすい。本研究では, このような内海で, しかも大水深にある港湾域の防波施設として, 上記した2つの形式の防波堤の折衷形式として, 重力式カーテン防波堤を新たに提案する。この防波堤は, 概略的には従来のカーテン防波堤を下部コンクリート構造体に剛結したついで方式にしたもので, 主に下部構造体の重量で抵抗する重力式の防波堤である。

本研究は, このような重力式カーテン防波堤を対象にして, その波浪制御効果と作用波力の特性を理論と実験の両面より明らかにする。特に, ここでは, 現地の構造物に即した模型堤体を採用して, 従来の研究であり知られていない上部矩形体や鋼管部分および下部構造体の波変形および作用波力に及ぼす影響などを明らかにする。また, 耐波安定性能や波浪の静穏化効果の予測という観点から, 波エネルギーの逸散効果を近似的に考慮する減衰波理論に基づく数値解析法(中村・井手, 1997)の適用性についても検討する。

2. 実験装置および実験方法

実験には, 長さ 28 m, 幅 1 m, 高さ 1.25 m の 2 次元水槽を用いた。この水槽の一端には, サーボ式モータを動力源とする反射波吸収式の造波装置が, 他端には, 端部から再反射波を防ぐために砕石からなる 1/5 勾配の消波

工が設けてある。

模型堤体には, 基本形として原型の重力式カーテン防波堤を 1/23.6 に縮尺した模型を用いた。この堤体は, 図-1 に示すように, 上部矩形堤およびカーテン版を支えるための鋼管を下部コンクリート構造体に剛結したついで方式の構造体である。このとき支持鋼管は, 現地を想定して図中に示すように水路幅の方向に全部で 5 本設けた。また, 下部コンクリート構造体は, 粒径 5~10 mm の採石を締め固めた基部マウンド上に設置した。

一方, 支持用鋼管の有無や上部工の有無の影響を検討するため, 基本形の模型堤体を以下のように変化させた堤体も用いた。①支持用鋼管を取り除き, 上部矩形堤とカーテン版とした模型(図-2)。②鋼管および上部矩形堤を取り除き, 鉛直版で置き換えた模型(図-3)。なお,

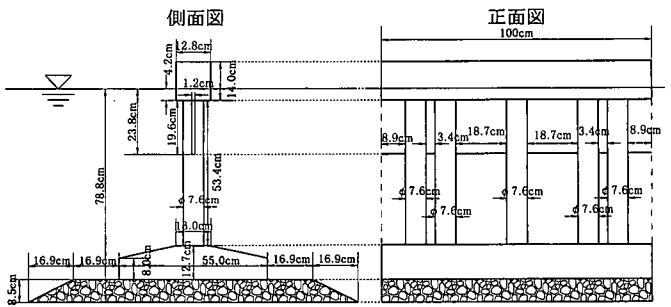


図-1 重力式カーテン防波堤の模型 (縮尺 1/23.6)

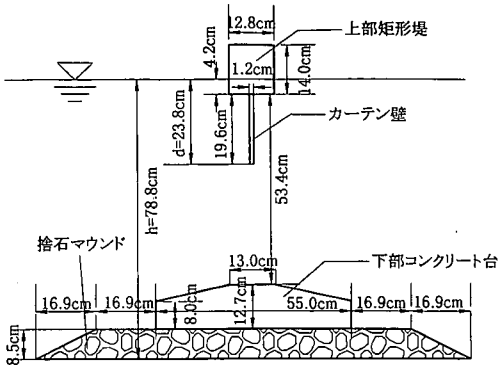


図-2 上部矩形堤を有するカーテン防波堤

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 正会員 兵庫県土木部
*** 正会員 工修 (株)ニュージェック 港湾・空港部
**** (株)クリアス

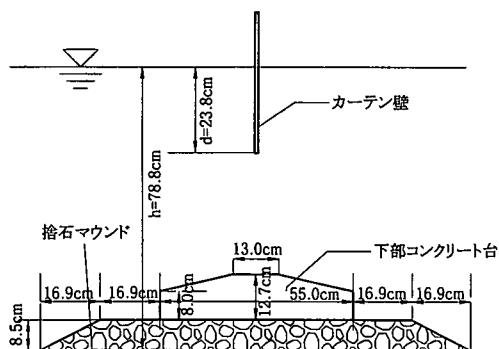


図-3 鉛直版のみのカーテン防波堤

これらの模型では、下部工として図-1に示す基本形と同じものを使用している。

実験では、堤体の全吃水 d （上部矩形堤があるときはその吃水を含む）を23.8 cmと一定にして、上記した3種類の堤体による反射波、透過波を測定した。このとき、反射波は、堤体の反射側に設置した2台の容量式波高計による水位変動を入・反射波の分離推定法を用いて分離解析して求めた。

また実験では、波の変形の測定に加えて、波圧計6台を用いた波圧分布の測定および片持ち梁形式の波力計とモーメント計を用いた水平波力と波力モーメントの測定も同時に行った。ただし、波力とモーメントの測定は、図-1の基本形堤体への測定装置の組み込みが難しいことから、上記した①、②の模型堤体に限定しており、しかも上部工（上部矩形堤とカーテン版）に作用する流体力のみとした。

堤体に作用させた入射波は、波高 H がほぼ6.5 cmと12.5 cmの2種類、周期 T が0.72 s～1.75 sの範囲の8種類である。このとき、水深 h は全実験を通じて78.8 cmと一定にした。

3. 理論解析法の概要

以下では各種の断面形状のカーテン防波堤による波浪の制御効果および作用波力の予測を目的として、中村・井手（1997）の減衰波理論に基づく数値解析法により各種の水理量の算定を行った。ここでは、その概要について紹介する。

この算定法は、カーテン防波堤など隅角部を有する構造物を対象にして、鋭端部よりの流れの剝離や渦流れの発生による逸散効果を近似的に考慮する方法である。具体的には、渦流れが影響する領域を流体速度に比例する抵抗が作用する減衰流体領域とするもので、この線形抵抗を有する流体と構造物との干渉により生じる逸散を流れ中の渦流れ等の発生による逸散として評価してい

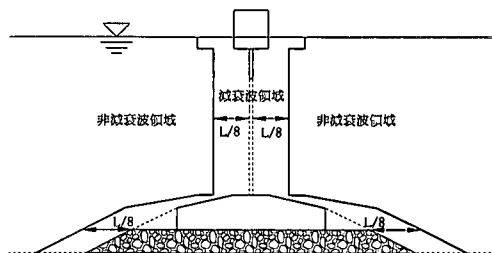


図-4 減衰波領域の設定法

る。この線形減衰を考慮した流体の運動方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho g z) - f_c \omega \vec{v} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\vec{v}$:流速ベクトル、 p :圧力、 ρ :流体密度、 g :重力加速度、 f_c :線形抵抗係数、 ω :角振動数（ $=2\pi/T$ 、 T :周期）である。

なお、流体運動の取り扱いが鉛直断面内での2次元運動に限定されており、波動理論としては、取り扱いが簡単になることから線形波動理論が仮定されている。

この算定法では、図-4に示すように、構造物まわりの波動場を線形減衰力が作用する減衰波領域とそれの作用しない非減衰波領域に分割する領域分割法が用いられている。そして、各領域内では任意断面形状の物体が取り扱えるようにグリーン関数法が使用されている。

減衰波理論に基づき、波の変形を取り扱うには、2つのパラメータの設定が必要になる。一つは、減衰波領域の広さであり、もう一つは線形抵抗係数 f_c である。本研究で対象にする重力式カーテン防波堤では、下部に透過性マウンドおよびその上にさらにコンクリート製の台形マウンドがある。このため、減衰波領域として、図-4に示すように、堤体の断面形状を基準にして、その前後に1/8波長に等しい距離で拡張した水域を減衰波領域として設定した。1/8波長としたのは、渦流れの影響領域が作用波の波長に比例して増大することを考慮したもので、中村・井手（1997）により用いられている値をそのまま採用した。また、線形抵抗係数 f_c は、やはり中村・井手により採用されている $f_c=0.15$ を中心にして3種類程度に変化させた。

4. 波変形に及ぼす上・下部工の影響

図-5、6は、図-1～3に示す各堤体の透過率 C_t の波周期による変化を示すもので、周期に関する無次元量として吃水・波長比 d/L が用いてある。図-5、6はそれぞれ入射波高 H が低いときおよび高いときの結果に対応する。図中には、上記した減衰波理論による図-2、3の

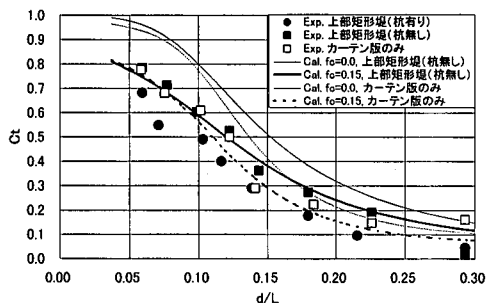


図-5 透過率 C_t に及ぼす支持鋼管および上部工の影響
(波高 $H=6.5$ cm, $d/h=0.302$)

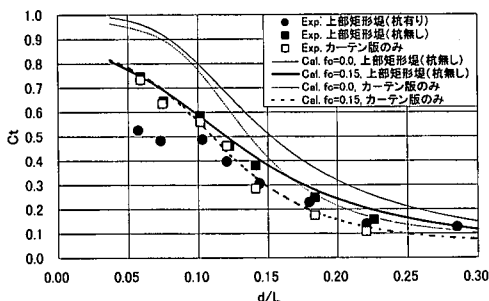


図-6 透過率 C_t に及ぼす支持鋼管および上部工の影響
(波高 $H=12.5$ cm, $d/h=0.302$)

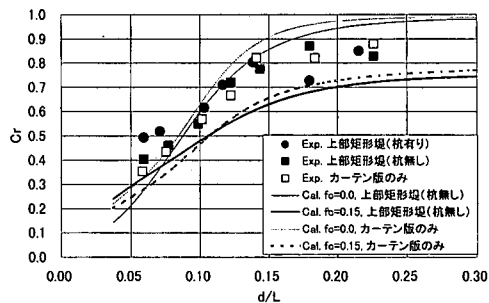


図-7 反射率 C_r に及ぼす支持鋼管および上部工の影響
(波高 $H=6.5$ cm, $d/h=0.302$)

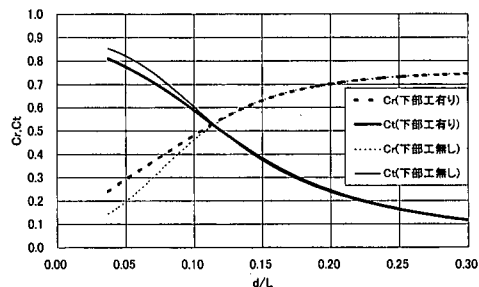


図-8 反射・透過率に及ぼす下部工の影響の算定結果 (上部矩形堤有り, $d/h=0.302$, $f_c=0.15$, $d/h_i=0.41$, 支持台上水深 $h_i=57.6$ cm)

堤体に対する算定結果についても併せ示した。

これらの図の実験結果に着目すると、 C_t が最も低いのは支持鋼管杭のある基本形の堤体で、これに続き杭および上部矩形堤を取り除き鉛直カーテン版のみとした堤体、基本形の堤体より杭を取り除いた堤体の順になっている。基本形の堤体で最も透過率が低くなるのは、水路幅方向に4割弱の投影幅を占める鋼管杭の遮蔽効果によると思われる。事実、基本形の堤体と残りの2堤体の透過率に有意な差異が認められるのは、鋼管下部の影響が現れてくる d/L の小さな長周期波の条件になっている。そして、現地に即したモデルでは、支持杭を無視した簡略化モデルによる透過率に比較して、約0.1~0.2程度の低下が見られる。

杭無しで上部矩形堤有りとした堤体とカーテン版のみとした堤体の透過率の差異は、 d/L が0.15程度と中間的な周期帯で拡大している。これは、図中に示す算定結果においても同様に認められ、上部工の有無など、いわゆる断面形状の効果によると思われる。ただし、この差異は d/L が小さな長周期側およびそれが大きな短周期側では縮小する傾向にある。また、上述してきた実験的な特性は、作用波高の大小により、多少の影響を受けるようであるが、それほど顕著でないことも認められる。

次に、算定結果と実験結果の比較を行うと、断面2次

元的な堤体の杭無しで上部矩形堤有りとカーテン版のみの場合に限定されるが、両堤体の場合共に線形抵抗係数 $f_c=0.15$ 程度にすると、算定結果は実験結果とほぼ一致するようになる。そして、 $f_c=0$ とした非減衰波の算定では、特に d/L が小さな長周期側で十分な予測が得られないことなどがわかる。これは、従来の研究(中村, 1984)で知られているようにカーテン版下端部よりの渦流れ等の発生によるエネルギー逸散が、長周期波の条件下で顕著になることによる。

一方、図-7は図-5と同じ入射波高の条件下での反射率 C_r の結果を示す。図中には同様に3種類の堤体に対する実験結果と減衰波理論による算定結果がプロットしてある。この図より、 C_r は3種類の堤体の間であまり顕著な差異は認められない。しかし、基本形の堤体では、やはり鋼管杭の遮蔽効果により、特に d/L が小さな長周期側で他の2堤体より反射率は大きくなる。

実験結果と算定結果を比較すると、杭無しの断面2次元堤体に対する反射率の実験結果は、透過率の場合と異なり、 $f_c=0$ とした非減衰波の算定結果に近くなっている。

算定結果において、このように異なる対応が見られる理由としては、カーテン防波堤の下部に形成される渦流

れの形成状況が反射側と透過側で異なることが挙げられる。事実、中村 (1984) は鉛直カーテン版まわりの渦流れの観測を行い、反射側に形成される渦が透過側のそれに比較して大規模で強度も大きいことなどを報告している。以上の比較から、現段階では一つの減衰係数を用いて、透過・反射率の両者を同時に予測することは困難で、渦流れの非対称性などが考慮できるより改良された数値解析法の展開が望まれる。これについては今後続く検討課題としたい。

最後に、図-8 は杭無しで上部矩形堤有りとした堤体 (図-2 の堤体に相当) において、下部工の有無による反射率と透過率の差異を減衰波理論に基づき理論的に検討した結果である。この図より、下部工の有無による C_r , C_t の差異は、 $d/L < 0.12$ の長周期側において見られる。これはよく知られているように、水深方向への波運動の影響が最大でも波長の 5 割程度までしか及ばないことによると考えられる。

5. 作用波力に及ぼす上部工の影響

図-9, 10 は、図-2, 3 の杭無しの断面 2 次元堤体に作用する水平波力と基部転倒モーメントに関する比較を示す。これら流体力は、次式による無次元量で表示してあ

る。

$$F^* = F / (\rho g d B H / 2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M^* = M / (\rho g d B h H / 2)$$

ここに、 F : 堤体の上部工 (図-2 の堤体では上部矩形堤とカーテン版、図-3 の堤体ではカーテン版) に作用する水平波力の振幅、 M : 上部工へ作用する波力による下部コンクリート台頂部まわりの転倒モーメントの振幅、 B : 堤体の横幅である。

実験では、水平波力および波力モーメントは、上部固定式の片持梁形式の波力計で測定している。このため、これらの測定流体力を用いて、まず波力の作用点を求め、下部コンクリート台の頂部まわりの転倒モーメントに変換する操作を行った。なお、実験値には波の進行方向に作用する波力と逆方向に作用する波力の平均値が採用してある。

図-9, 10 中には、非減衰波の $f_c = 0$ とした算定結果および透過率に関する一致度がよかった $f_c = 0.15$ とした減衰波理論による算定結果も併せ示してある。これらの図より、水平波力と転倒モーメントの両者は、実験結果および算定結果共に、上部矩形堤有りの場合の方がカーテン版のみの場合よりも小さくなることが認められる。この傾向は、特に、無次元流体力がピークを示す周期条件下で顕著で、約 2 割程度低下することがわかる。これは、上部矩形堤を設けると波圧の絶対値が減少することや、その前後の波圧の位相差もカーテン版のときよりも緩やかになり、結果的に波力の低減を招いたと考えられる。このような上部矩形体に対する波力の低下は、減衰波理論による算定結果においてもより顕著に認められる。また、非減衰波の $f_c = 0$ とした算定結果は、実験結果および減衰有りとした算定結果を上回る傾向が認められ、渦流れ等の発生は結果的に作用波力を低減させるこ

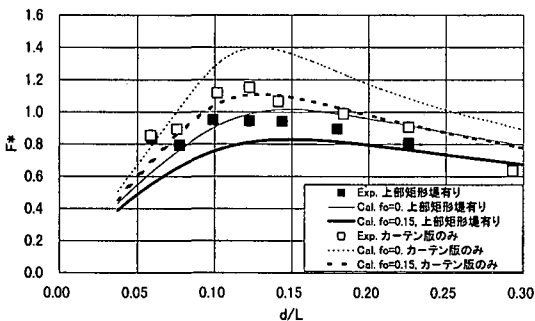


図-9 水平波力に及ぼす上部工の影響
($H = 6.5 \text{ cm}$, $d/h = 0.302$)

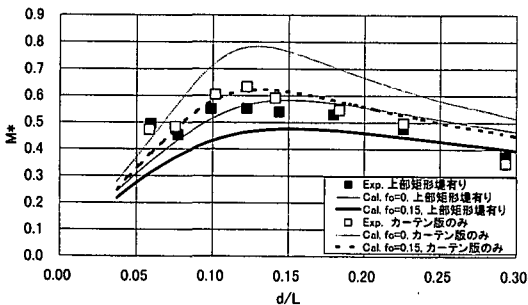


図-10 転倒モーメントに及ぼす上部工の影響
($H = 6.5 \text{ cm}$, $d/h = 0.302$)

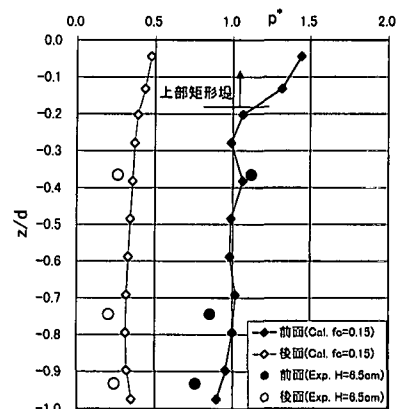


図-11 堤体まわりの波圧分布 (上部矩形堤有り, $d/L = 0.125$)

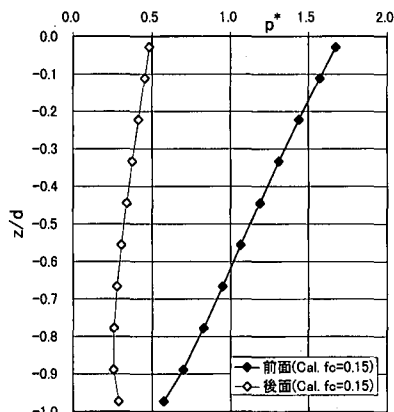


図-12 堤体まわりの波圧分布 (カーテン版のみ, $d/L=0.125$)

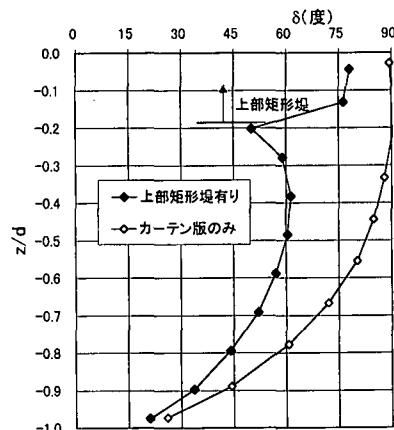


図-13 前後面波圧のピークの出現位相差 ($d/L=0.125$, $f_c=0.15$)

とがわかる。このような傾向は、渦流れの数値シミュレーション結果に基づき、作用波力の算定を行った中村・久保 (1988) によっても同様に確認されている。

図-11～13 は、上記した上部矩形堤の存在による波力低下の原因の検証例を示す。これらの図は、無次元波力およびモーメントが極大になる周期条件下 ($d/L=0.12$ 程度に相当) での堤体まわりの無次元波圧分布 p^* および堤体前後面の波圧の位相差 δ (前面波圧の位相を基準) の分布を示し、図中では、堤体没水面の水深方向の座標 z (水面に原点、鉛直上方が正) を吃水 d で無次元化した鉛直座標の変化でプロットしてある。ここで、無次元波圧 p^* は、波圧振幅を入射波振幅と流体の単位体積重量の積で除した量である。

図-11 と 12 の比較から、上部矩形堤を設けると、特に堤体の反射側に相当する前面側の矩形堤下部付近で波圧が低下して、全体的に様な波圧分布に近づく傾向が認められる。図-11 中には、参考データとして、支持杭有りでしかも上部矩形堤有りの条件下で測定した波圧分布の測定結果についても示してあり、その変動傾向は上部矩形堤有りのときの算定結果と類似している。

一方、堤体前後面の波圧の位相差 δ を示す図-13 より、上部矩形堤を設けると、カーテン版のみの場合より、前後面の波圧の位相差が減少して、結果的に波力の低下を招くことが確認できる。今後は、より詳細な実験的検討を含めて、波力に及ぼす上部矩形堤の影響を明らかにしていきたい。

6. 結 語

(1) 渦流れ等の発生による逸散効果を近似的に考慮

した減衰波理論を用いて、上部矩形堤や下部構造体の影響を考慮して重力式カーテン防波堤による透過率をほぼ推定できる。ただし、反射率については、減衰を考慮しない算定結果に近く、同一の線形抵抗係数を用いて、反射率および透過率の両者を推定することは難しい。

(2) 現地の防波堤のように上部矩形堤を有するカーテン防波堤では、これを無視してカーテン壁のみとした場合に比較すると、透過・反射率の両者に多少の相違が見られ、この差異は比較的短周期波の条件下で目立つようになる。

(3) 上部矩形堤を有するカーテン防波堤では、それを無視してカーテン壁のみとした場合に比較すると、水平波力および転倒モーメントは約 2 割程度減少する。そして、この減少傾向は、波高で無次元化した波力係数が極大値を示す周期条件下で顕著になる。これは、上部矩形堤の前後の波圧の絶対値や位相差が鉛直版のみとした場合よりも減少することによる。

(4) 鋼管杭や下部構造体の透過・反射率に及ぼす影響は、長周期波に対して有意になり、この影響は構造体の鉛直位置と波長の比に関係する。

参 考 文 献

- 中村孝幸 (1984): カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と作用波力に関する研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 512-516.
- 中村孝幸, 久保達郎 (1988): はく離渦の減衰特性を考慮したカーテン防波堤まわりの流況の算定法, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 607-611.
- 中村孝幸・井手善彦 (1997): 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第 13 巻, pp. 177-182.