

異吃水二重式カーテン防波堤の効果と作用波力に関する研究

中村 孝幸*・神川 裕美**・河野 徹***・榎本 一徳***

1. はじめに

これまでに著者ら (1999) は, 反射波災害などの防止を目的として, 透過波のみならず反射波の低減も可能な異吃水の二重式カーテン防波堤の構造形式を提案し, 透過波および反射波の低減機構や低減効果などについて明らかにしてきた。ここでは, 実際設計で必要になる防波堤に作用する波圧・波力の水理学的な特性やその予測法について究明する。この際, 二重式カーテン防波堤の構造形式としては, 従来の検討結果より透過波と反射波の両者が効果的に低減できることが判明している, 前面壁の吃水深が後面壁のその半分程度の異吃水二重式カーテン防波堤に限定した。

また, 杭式防波堤であるカーテン防波堤は, 構造強化のために上部工を設けることが多く, しかも本研究で対象にする二重式構造のカーテン防波堤では, 原理的に遊水室内のピストンモードの波浪共振を利用することから, 揚圧力などの作用波力や消波効果に及ぼす上部工の影響が懸念される。ここでは, このような作用波力や消波効果に及ぼす防波堤の上部工の影響についても主に実験的に検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験は, 長さ 28 m, 幅 1 m, 高さ 1.25 m の 2 次元造波水槽を用いて行った。実験に用いた模型堤体は, 図-1 に示す異吃水二重式構造のカーテン防波堤で, その模型縮尺は 1/16 程度を想定した。前後壁の吃水深 d_1 , d_2 や遊水室幅 B は, 以前の検討 (中村ら, 1999) で透過・反射波の低減に有効であることが確認されている図中に示す値を用いた。

前後壁は, それらに作用する水平波力が測定できるように, 上部固定の波力計を兼ねた片持梁によりそれぞれ独立に支持されている。各片持梁には, 4 枚の歪ゲージが貼り付けてあり, モーメントの引算回路により壁に作

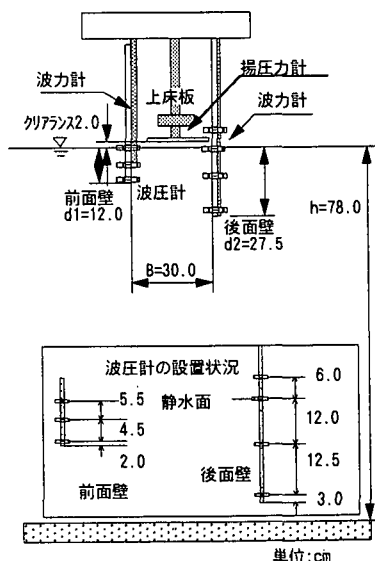


図-1 堤体模型

用する水平波力が検出できるようにしてある。このとき, 前後壁には, 軽量で剛性の強い厚さ 1 cm のアルミ板を用いた。これら水平波力計の固有振動数は, 波力測定時ではほぼ 5 Hz 以上で, 非衝撃性の波力測定に対しては作用波の周期条件を考慮して十分なものと判断した。

このような波力測定に加え, 前後壁の波圧分布についても検討できるように, これら壁の裏表に計 14 台の波圧計を図中に示すように配置した。

また, ここでは上部工を想定した上床版を設けた堤体についても実験を行っており, このとき上床版は静水面から 2 cm 上に上部固定式の揚圧力計により支持した。この揚圧力計は, 揚圧力が衝撃性の波力であることを考慮して, 固有振動数がほぼ 50 Hz 程度以上となるように十分に剛な構造とした。

(2) 実験方法と条件

実験では, 上記のような波力・波圧測定に加え, 波高計 5 本を用いて, 反射・透過率および前面壁の前面での水位変動を同時に測定した。用いた入射波の条件は, 波高 H が 5 cm, 10 cm, 15 cm の 3 種類, 周期 T が 0.78 s ~ 1.68 s の範囲の 12 種類である。

* 正会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科
** 正会員 (株)愛媛建設コンサルタント 技術部
*** 正会員 復建調査設計(株) 沿岸開発部

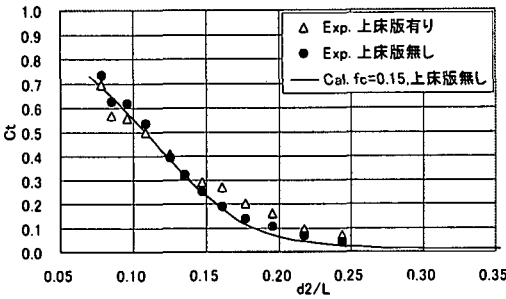


図-2 上床版の有無による透過率の変化
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$)

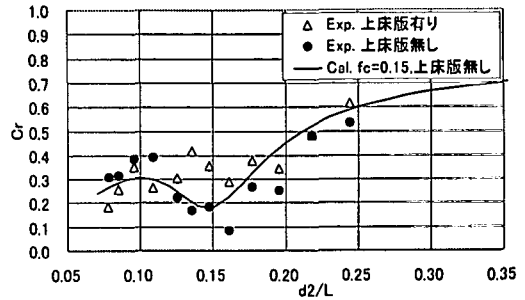


図-3 上床版の有無による反射率の変化
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, $H/h=0.128$)

3. 透過波及び反射波の特性

図-2, 図-3 は, 透過率 C_t ・反射率 C_r の後面壁吃水深 d_2 と波長 L の比 d_2/L による変化を示す. 図中には, 上部工を模擬した上床版があるときおよびないときの両実験結果ならびに上床版がないときを想定した減衰波理論 (中村・井手, 1997) による算定結果を示す. 算定で用いた線形抵抗係数 f_c は, 中村・井手 (1997) および中村ら (1998) によりカーテン防波堤に対して推奨されている $f_c=0.15$ とした.

両堤体による透過率 C_t は, 図-2 に見られるように, d_2/L の小さな長周期側になるにつれて増大し, 上床版の有無による差異はほとんど認められない.

一方, 図-3 に示す反射率 C_r は, 特定の d_2/L で一旦極小となる特有な変動を示す. このような反射波の低減は, 前報告 (中村ら, 1999) で明らかにしたように堤内でのピストンモードの波浪共振や前面壁前後での有意な位相差の出現による渦流れの増大現象による結果である. そして, 上床版のある堤体では, それのない堤体の結果と比較すると, 反射波の低減度合いが緩やかになることや, その傾向は反射率が一旦極小となる $d_2/L=0.15$ 付近で顕著になることが分かる. これは, 反射波の逸散に大きく影響を及ぼす堤内での波浪共振現象が上床版の存在により抑制されたものと考えられる. このように, 反射率については上床版の存在により多少ながら増大する傾向にあることなどが判明した.

4. 水平波力の特性

(1) 前後壁に作用する波力と波圧

図-4, 図-5 は, それぞれ前面壁, 後面壁に作用する水平波力 F_f , F_b の d_2/L による変化を示す. このときの結果は, 上床版がないときに相当しており, 図中には $f_c=0.15$ とした減衰波理論による算定結果についても併せ示す. なお, 図中では, 水平波力の極大値の無次元量として波力強度に相当する次式の F^* で表示してある.

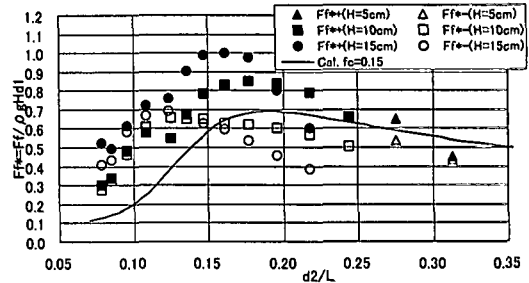


図-4 前面壁に作用する波力 F_f^* ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, 上床版無し)

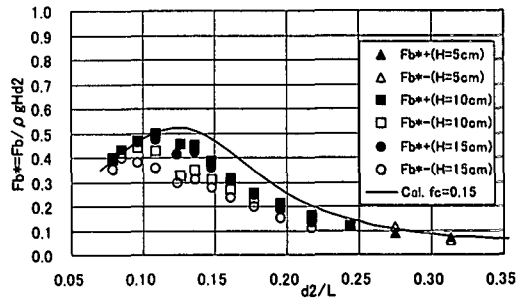


図-5 後面壁に作用する波力 F_b^* ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, 上床版無し)

$$F_{f,b}^* = F_{f,b} / \rho g H b (d_1, d_2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, ρ : 流体密度, g : 重力加速度, b : 堤体長, d_1 , d_2 : 前壁, 後壁の吃水深である. また, 図中の実験値 F^{**} , F^* はそれぞれ波の進行方向および逆方向に作用する極大波力の無次元量に相当する.

図-4 より, 前面壁の正波力ピーク F_f^* は, $d_2/L=0.16$ 付近で極大になり, それより短・長周期側では減少する傾向が確認できる. この極大となる d_2/L の条件は, 図-3 に見られるように反射率が極小となる条件と概略的に一致している. そして, 測定波力の正ピークは算定結果より大きくなる傾向が強く, この傾向は特に長周期側で顕

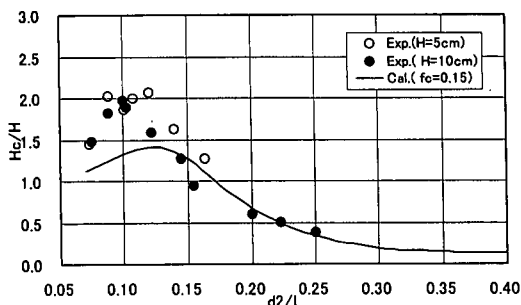


図-6 堤体内の平均波高 ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$)

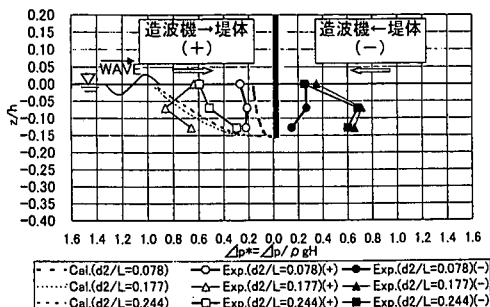


図-7 前面カーテン壁に作用する極大差圧強度
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, $H/h=0.128$, 堤内上床版無し)

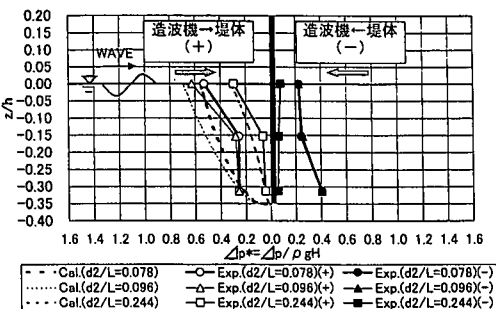


図-8 後面カーテン壁に作用する極大差圧強度
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, $H/h=0.128$, 堤内上床版無し)

著に現れている。このように算定結果を上回る正波力が観測される理由としては、前面壁への波の遡上の影響や前面壁前後の水位変動の位相差の影響が挙げられる。

一方、前面壁の負ピーク F_{δ}^{-} は、 F_{δ}^{+} よりも d_2/L の小さな長周期側で極大を示す傾向が認められる。そしてこのような傾向は、図-5 に示す後面波力 F_{δ}^{*} においても認められる。この極大を示す $d_2/L=0.12$ 付近は、図-6 に示すように堤内波高比が極大となる条件とほぼ一致しており、 F_{δ}^{-} と F_{δ}^{*} は、堤内での波高増幅現象により極大を示すものと理解される。このとき、 F_{δ}^{*} は、最大でも 0.5 程度であり、 F_{δ}^{+} に比較するとほぼ半減することなどが

分かる。また、後面壁に対する算定結果は実験結果よりやや大きく現れる傾向が認められるものの、全体的にはほぼ妥当な予測になっている。

次に、カーテン壁の部材設計に当たり必要になる壁前後における同時波圧の差 Δp の鉛直分布について検討してみる。

図-7, 8 は、代表的な波周期の条件に対して、このような差圧の鉛直分布をそれぞれ前後壁に分けて示す。図中では、設計の際に重要となる極大差圧 Δp の正負のピークの分布を示すもので、比較のため減衰波理論による算定結果についても併せ示す。ここでは、極大差圧の無次元量としては、次式によるものが用いてある。

$$\Delta p^* = \Delta p / \rho g H \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-7 より、前面壁の差圧の正ピークは短周期より長周期になると、概略的にほぼ様な分布に近づくことが分かる。そして、前面壁の下端付近では、正負のピーク共に比較的大きな強度を示すことが認められ、これは渦流の発生によるものと推測される。そして、減衰波理論による結果と比較すると、長周期波になると様な差圧分布に近づくという定性的な傾向は一致するものの、定量的な一致度は十分とはいえない。

次に後面壁の差圧分布を示す図-8 に着目すると、差圧強度は静水面付近で最も大きく、吃水の半分程度まで深くなると静水面での強度の半分以下まで急激に低下する。ただし、負のピークでは、長周期波になるにつれて、下端部での強度が増す傾向にある。これは、下端部よりの渦流の増大によると考えられる。また、実験結果と減衰波理論による算定結果では、周期による差圧強度の変動は同様の傾向を示し、定量的にもほぼ対応する結果となっているが、板の中央部で急減する特性は再現されていない。このように板の中央部で差圧が急減する理由としては、やはり前面壁よりの渦流の発生による影響と考えられる。

(2) 全水平波力

図-9 は、堤体に作用する同時全水平波力 F_{δ} の d_2/L による変化を示す。波力の無次元量としては、後面壁吃水 d_2 で無次元化した F_{δ}^* ($=F_{\delta}/\rho g H b d_2$) が用いてある。この図より、全水平波力は d_2/L の小さな長周期側になると増大することや、さらにより長周期の条件下では、逆に減少するという傾向が実験・算定ともに確認できる。そして、減衰波理論による算定結果は、周期条件に関係なく、十分とはいえない。これは、やはり図-4 に示したように、前面壁に作用する波力の予測が不十分であることによる。

次に、図-10 は、前面壁に作用する極大正波力と後面壁のそれとの位相差 δ (度) の d_2/L による変化を示す。

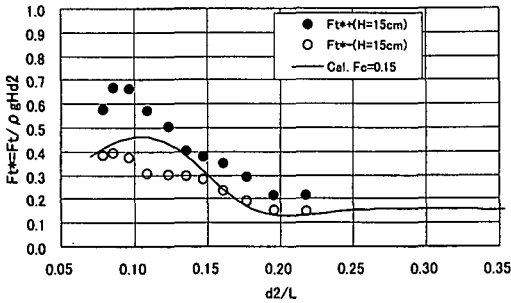


図-9 堤体に作用する全波力 F_t^*
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, 上床版無し)

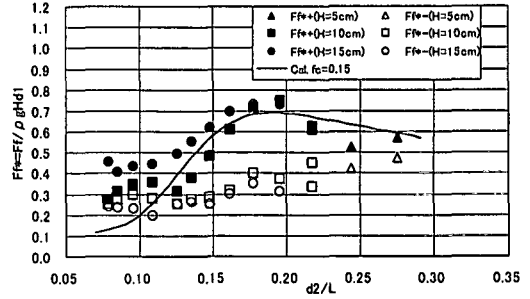


図-11 前面壁に作用する水平波力 F_f^* ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, 上床版有り)

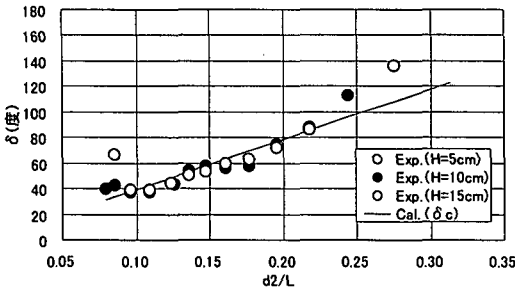


図-10 前面壁の極大波力の位相差 δ
($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.352$)

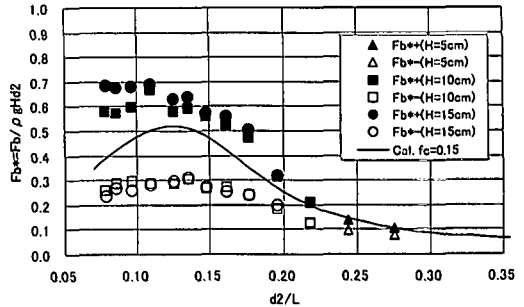


図-12 後面壁に作用する水平波力 F_b^* ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$, 上床版有り)

図中には、前後壁間隔 B を波速 C で除して得られる位相差 δ_c についても併せ示す。この図より、前後壁に作用する波力の位相差は、単純に堤内幅を波速で除して得られる値でほぼ近似できることが分かる。

このように二重式カーテン防波堤では、ピストンモードの波浪共振を利用しているにも関わらず、前後壁に作用するピーク波力で有意な位相差があり、その結果、全体波力としてはある程度の低減が可能と考えられる。

(3) 上床版の有無による影響

図-11, 図-12は、堤内に上床版を設置したときの、前面壁、後面壁に作用する水平波力 F_f , F_b の d_2/L による変化を示す。上床版のない図-4, 5の結果と比較すると、上床版を設けることにより、 F_f の正負ピークは全体的に減少することや、 F_b については逆に増大する傾向が見られ、その傾向は正ピークで特に顕著である。そして、 F_f の正負ピークが減少する理由としては、上床版により堤内共振が抑制されることによると考えられる。また、 F_b の正ピークが増大する理由としては、水塊が上床版に衝突した後に水平方向に流れ、後面壁に副次的に作用するため、全体的に増大するものと考えられる。このような上床版に衝突する水塊の副次的な影響は、前面壁にも見られ、結果的に F_f の正ピークの低下にも関係しているものと推測される。

このように、上床版を設けることにより、作用波力は

前面壁では減少し、後面壁では増加することなどが判明した。

5. 揚 圧 力

図-13は、上床版に作用する揚圧力 F_u の d_2/L による変化を示す。図中の無次元揚圧力 F_u^* は次式による。

$$F_u^* = F_u / \rho g H A \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 A : 上床版の面積である。この図より、揚圧力は特定の d_2/L の条件下で極大となり、その条件は、図-6に示す堤内での平均波高比が極大となる条件にほぼ一致する。このように揚圧力が極大となるのは、堤内でのピストンモード共振に関係することが分かる。そして、共

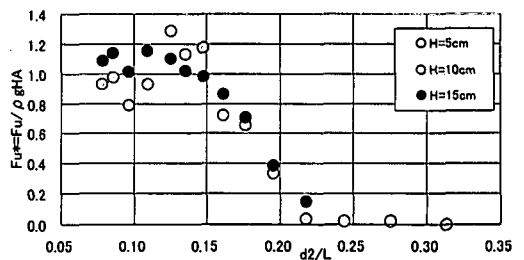


図-13 上床版の揚圧力 F_u^* ($d_1/d_2=0.436$, $d_2/h=0.353$)

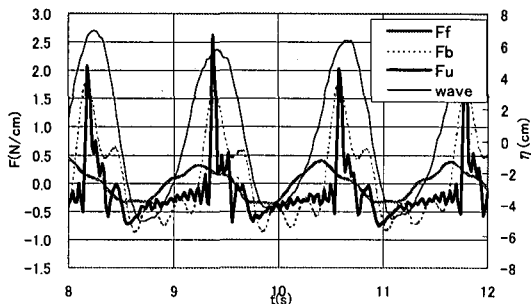


図-14 水平波力と揚圧力の位相関係
(波力は単位幅当り, $d_2/L=0.125$, $d_1/d_2=0.436$, $H/h=0.128$)

振点に相当する $d_2/L=0.12$ 付近での堤内の平均波高は入射波高の2倍程度に達するが、揚圧力の強度は1.3程度と比較的低いことも認められる。

最後に図-14は、前後壁に作用する波力、揚圧力、そして堤体前面での水位の変動の時系列の代表例を示す。この図より、揚圧力 F_u と後面壁に作用する波力 F_b のピークはほぼ同時に現れることがわかる。そして、本研究では、その他の波条件に対しても、 F_u と F_b の間でほぼ同様な位相関係にあることを確認している。このような事実より、二重式カーテン防波堤では、後面壁に作用する水平波力と上部工に作用する揚圧力はほぼ同時に作用するものとして設計される必要があり、かなり強度の大きな波力を水平方向と鉛直方向より同時に受けることになる。

6. 結 語

(1) 異吃水の二重式カーテン防波堤に上部工を想定

した上床版を設けると、透過率はほとんど変化しないが、反射率は、それが無いときよりも増大する。

(2) 二重式カーテン防波堤に作用する水平波力は、入射波高のみならず後面壁の吃水 d_2 と波長 L の比により変化する。そして、入射波高で除した無次元水平波力は、前後壁に対して異なる d_2/L の条件下でピークを示す。

(3) 上床版を設けると、前後面のカーテン壁に作用する水平波力は、それが無いときに比較して1割程度の増減が見られる。

(4) 遊水室内の上床版に作用する揚圧力は、衝撃性の波力であり、しかもほぼ後面カーテン壁に作用する水平波力と同位相で極大になるため、設計に際して注意する必要がある。

(5) 減衰波理論に基づき、異吃水の二重式カーテン防波堤による透過・反射波および水平波力の特性がほぼ推定できる。ただし、前面壁に作用する水平波力については、比較的長周期の波条件下での予測が不十分である。

参 考 文 献

- 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.
- 中村孝幸・中村文彦・川部正司・井上温人・森本 暁・後藤大介(1998): 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 781-785.
- 中村孝幸・神川裕美・河野 徹・榎本浩司(1999): 透過波と反射波の低減を可能にするカーテン防波堤の構造形式について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 786-790.