

ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造の
海水交換型防波堤の開発

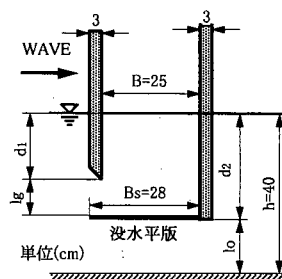
中村孝幸*・高木伸雄**・中山哲嚴***・河野 徹****

港内静穏度を高めるため、港湾域は閉鎖性海域になりがちで、港内水の水質悪化が問題になる港湾も見られる。ここでは、このような港湾域における海水交換を促進する目的から、海水交換型防波堤の開発を目指すもので、特に本来の防波施設としての機能である来襲波の遮断および反射波の低減などをできるだけ維持して、海水交換が有効に行える構造体について究明した。この際、基本構造体としては、低反射型防波堤である異吃水2重式カーテン構造を採用した。

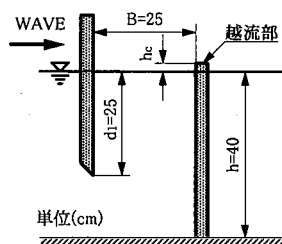
1. はじめに

一般に港湾は、厳しい波浪環境下にある場合が多く、外郭施設の整備などにより、船舶の接岸や荷役業務に対して十分に安全のように港内波浪の静穏化が求められる。しかし、静穏度を求めるあまり、港内外の海水交流が抑止され、水質悪化が問題になっている。その対策として古くから透過性防波堤の適用や、海水交換型防波堤の開発も進められてきている。従来、海水交換型防波堤としては、堤体の一部に通水孔を設け、潮流や波浪流等の流れの疎通をよくするものや(猿川ら, 1993; 小田ら, 1995; 森田ら, 1999)、さらに越流工や弁などを設けて通水孔内の流向を制御するものなど(岡本ら, 1985; 道下ら, 1988; 柳瀬ら, 1991; 塩崎ら, 1996; 下迫ら, 1999)、また別途に潜堤を設けるもの(山本ら 1987)などが知られている。いずれもなるだけ防波・消波機能を維持しながら、通水あるいは海水交換機能を持たせるような工夫がなされているが、遮蔽効果や反射波低減効果が十分でないものや構造が複雑すぎる例なども見られる。

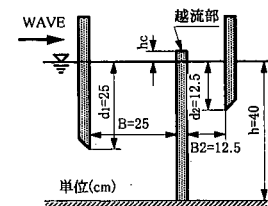
本研究も、やはりこのような海水交換型防波堤の開発を目指すもので、特に本来の防波施設としての機能である来襲波の遮断および反射波の低減などになるだけ維持して、海水交換が有効に行える構造体について究明する。このとき、構造体としては、比較的単純な断面で低反射機能を有する異吃水 2 重式カーテン構造(中村ら, 1999)を基本的に採用し、主に i) 潮流や波浪流等の流れの通水機能を期待する下部透過型の構造体と ii) 後面壁上部に越流工を設け越波による海水交換を期待する構造体の 2 種類を開発対象にする。特に前者については、下部開口部の拡幅による透過波の増大を没水平版の採用によりどの程度抑制できるかについて、また後者については、2 重式カーテン構造で特徴的な遊水室内のピストンモー



图一1 下部透過型堤体



图—2 越流型堤体



圖一3 低透過性越流型堤體

表-1 実験で用いた下部透過型堤体の各寸法 (単位: cm)

没水平版の有無	d_1	d_2	l_a	l_o
あり	25	35	9	5
あり	17	25	7	15
なし	25	35	15	5
なし	17	25	23	15

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	農博	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部長
正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産研究室長
正会員		復建調査設計(株)総合技術部長

ド波浪共振による越流量の増大がどの程度期待できるかについて検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体

模型堤体には、模型縮尺が1/15程度の図-1～3に示すものを用いた。これらはいずれも鉛直版2枚ないしは3枚で構成され、遊水室内でのピストンモード波浪共振による版下端部での渦流れの増大効果により反射波を低減する機構（中村ら，1999）を採用している。鉛直版は両側に設けた側壁で支持する構造としており、堤体1ユニットの長さは50 cmである。実験では、水槽幅（1 m）にほぼ等しくなるように2基のユニットを直列に配置した。

a) 下部透過型堤体：図-1に示す模型は、潮流や波浪流等の流れの通水機能を維持するため下部透過型構造としてある。通水機能を上げるため、下部通水開口長を大きくするとき透過波の増大が懸念されるが、ここでは図中に太線で示す没水平版の採用により、どの程度透過波が低減できるかを検討してみた。このとき、図中に記号のみで示す量は、実験で各種に変化させており、その代表例を表-1に一括して示す。

b) 越流型堤体：図-2, 3に示す模型であり、遊水室内のピストンモード波浪共振を利用して越流量を増加させ、海水交換を進める形式の堤体である。図-3の堤体では、越流に伴う透過波の増大を抑制するため、越流部背後にさらにカーテン版を設けてあり、内港からの作用波に対する反射波低減工としても作用するようにしてある。

図-2の堤体では、越流部の天端高さ h_c の影響を検討するため、これを-5 cm から +4 cm の範囲内で4種類に変化させた。ただし、越流量の測定実験では、天端が水面下となる場合には測定が困難であるため、 $h_c = 0 \sim +4$ cm の範囲内の3種類とした。

(2) 実験方法および波条件

実験では、計5本～8本の容量式波高計を用いて、各堤体の反射率 C_r と透過率 C_t および遊水室内外の水面変動等を測定した。このとき反射率は、入・反射波の分離推定法を用いて求めた。また図-2の越流型堤体では、越流部よりの越波量を堤体1ユニット分について、有効波数内の5波～10波分について越流升を用いて測定した。

用いた波条件は、ピストンモードの波浪共振条件を考慮して、周期 T が0.9～2.0 sの範囲の8種類程度、入射波高 H は5 cm, 10 cmの2種類とした。

3. 下部透過型堤体における没水平版の効果

図-4, 5は、図-1に示す下部透過型堤体において、没水平版を設けないで通水開口長 $l_0 = 15$ cmとしたときの反射率 C_r と透過率 C_t の波周期および作用波高による変化を示す。この図を含め、以下では、波周期に関する無次元量として、遊水室幅 B と波長 L との比が用いてある。

図中には、中村・井手（1998）の減衰波理論による算定結果についても合わせて示す。また、比較のため、算定結果のみであるが、通水開口部のないときの反射率の算定結果についても示す。この際、減衰波理論による算定では、線形抵抗係数 f_c が必要になるが、ここでは従来成果（中村ら，1999）に準じて、 $f_c = 0.2$ を用いた。

これらの図より、通水開口部の有無に関係なく、反射率 C_r はほぼ同じ B/L の条件下で一旦極小となる変化を示すことが分かる。これは、既に中村ら（1999）により報告されているように、 C_r が極小となる条件下で遊水室内のピストンモード波浪共振が発生し、前面カーテン壁下部付近に強い渦が形成されることによる。 B/L の小さな長周期側では、通水開口部の有無により差が見られるが、これは開口部を設けることによる透過波の影響による。

一方、透過率 C_t は、通水開口部を設けることにより特に長周期側で比較的大きな値になることが認められる。

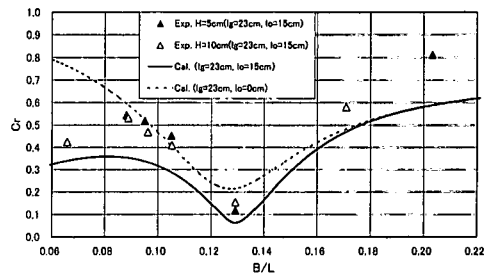


図-4 通水透過部の有無による反射率 C_r の変化（水平版のないとき、 $d_1 = 17$ cm, $B = 25$ cm）

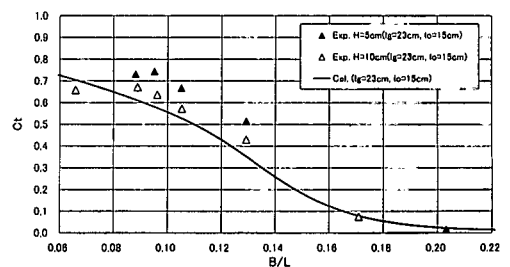
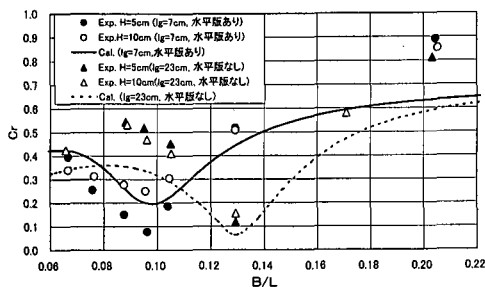
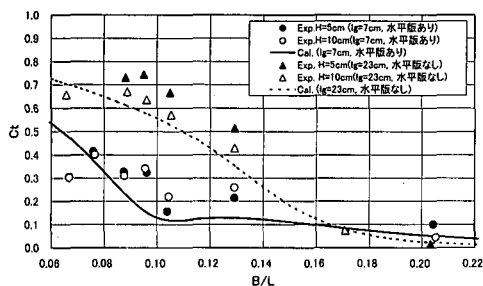


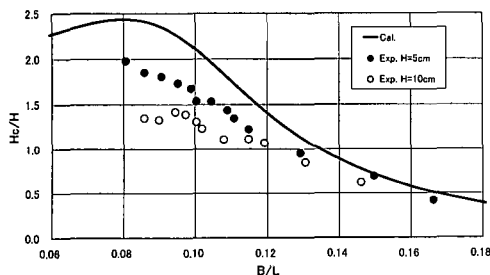
図-5 通水透過部の有無による反射率 C_t （水平版のないとき、 $d_1 = 17$ cm, $B = 25$ cm）



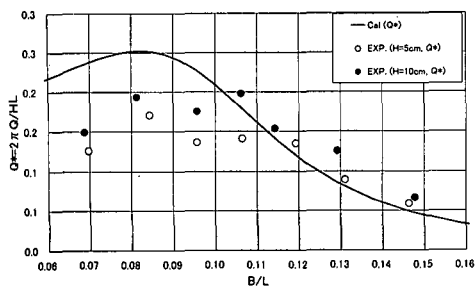
図—6 水平版の有無による反射率 C_r の変化 ($B=25$ cm, $d_1=17$ cm)



図—7 水平版の有無による透過率 C_t の変化 ($d_1=17$ cm, $B=25$ cm, $l_0=15$ cm)



図—8 遊水室内の波高比(越流なし, $d_1=25$ cm, $B=25$ cm)



図—9 越流型防波堤の越流量(算定結果の比較, $h_c=0$ cm)

このため、通水機能は満足されるものの、波浪の遮断効果は十分でないと判定される。

図—6, 7 は、下部透過型堤体において透過波の低減を目的として、没水平版を設けたときの反射率と透過率の実験結果および算定結果を示す。図中には、比較のため没水平版のないときの結果も合わせて示す。

これらの図より、没水平版を設けると、 C_r が極小となる条件は、水平版のないときに比較して長周期側に移行することなどが実験・算定結果の両者で認められる。これは、没水平版を設けることで、遊水室内の水深が浅くなり、版上の波長が短くなることに起因する。

次に透過率 C_t は、図—7 に見られるように没水平版を設けると、特に B/L の小さな比較的長周期の条件下で低くなることが認められる。これは、没水平版を設けることで流体の鉛直運動が拘束されるためと考えられる。このような水平版による透過波の低減効果は、L 字型カーテン版に対する波浪制御効果を数値波動水路により検討した蔣ら (2000) によっても報告されている。

本研究では、上記で紹介した通水開口長 $l_0=15$ cm のケースに加えて、 $l_0=5$ cm についても検討しているが、やはり水平版の有無の影響は同様の傾向にあることが確認されている。

このように、遊水室内に背後壁開口部に一致するように水平版を設けると、通水機能の維持のため通水開口長を比較的広くしたままで、反射波の低減効果を損なうことなく、しかも透過波についても有意に低減できることが分かる。

4. 越流型堤体の越流量と波浪制御効果

(1) 越流量

図—2, 3 に示す越流型堤体では、越流量増大のため遊水室内のピストンモードの波浪共振を利用する。図—8 は、背後カーテン壁の天端高さを十分に高くして、越流がない状態での遊水室内の空間平均波高 H_c の B/L による変化を実験結果と算定結果の両者について示す。なお、両結果において、対象とした周期条件の範囲内では、遊水室内の波高の空間変動はほとんど見られず、ピストンモードに近い状況にあったことを確認している。

この図に見られるように、入射波高で無次元化した遊水室内の波高は、 $B/L < 0.12$ の条件では入射波高を上回る大きさになり、後述する反射波の低減効果の著しい $B/L < 0.1$ の長周期波に対しては増幅割合も比較的大きくなることなどが分かる。実験結果は、算定結果よりも全般的に低く、実在流体場では波浪共振点付近でより大きな逸散を生じているためと推定される。

図—9 は、図—2 に示す堤体で後壁の天端高を静水面位置 ($h_c=0$ cm) としたときの越流量を示す。ここで、越

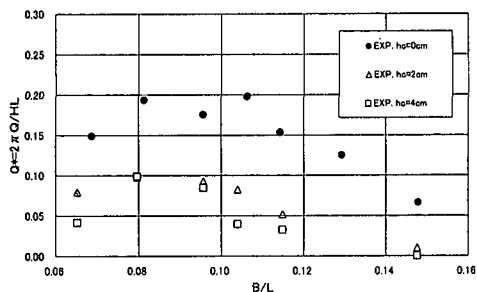


図-10 越流量に及ぼす後壁天端高さの影響 ($H=10$ cm)

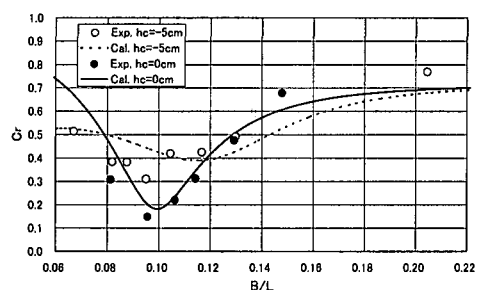


図-11 越流型防波堤の反射率 C_r ($H=10$ cm, $B=d_1=25$ cm, $h=40$ cm)

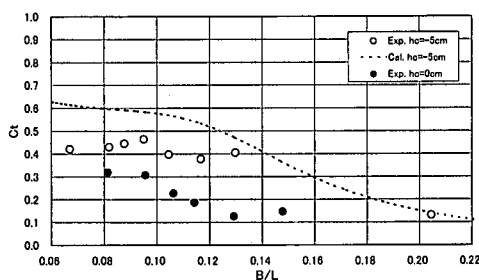


図-12 越流型防波堤の透過率 C_t ($H=10$ cm, $B=d_1=25$ cm, $h=40$ cm)

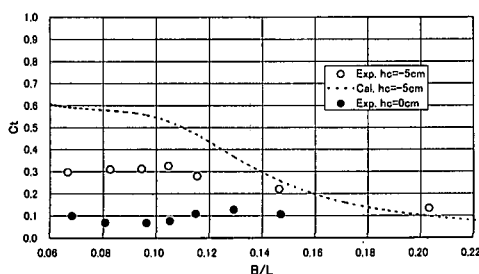


図-13 透過率: 越流型防波堤に設けた背後カーテン壁の効果 ($H=10$ cm)

流量としては堤体の単位幅当たりで一波当たりの量 (= Q) としてあり、これを進行波の半周期当たりの流体移動量で無次元化してある。図中には、上記した遊水室内の波高変動の算定結果と堰の越流公式とを組み合わせた越流量の算定結果についても合わせ示してある。

ここでは、越流公式として一般的に知られている次式のものを用いた (例えば Daily ら, 1966)。

$$q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} h_w^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q : 越流量, C_d : 無次元流量係数, g : 重力加速度, h_w : 堰上端の水頭高さである。

越流型堤体において、 h_w は時間的に変動することから、遊水室内の水位変動が正弦的に変化するものと仮定して、遊水室内後面壁より上側の水位を h_w として適用すると、波の 1 周期あたりの越流量 Q は次式で求められる。

$$Q = \int_{\Delta t} C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left(\frac{H_c}{2} \sin \omega t - h_c \right)^{\frac{3}{2}} dt \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Δt : 遊水室内の水面が後壁天端上にある時間, ω : 角振動数 ($=2\pi/T$) である。算定で C_d には、水底からの天端高さの影響を考慮して 0.82 を用いた。

図-9 に見られるように、無次元越流量は、図-8 に示す遊水室内の波浪共振度合いに対応して増加する傾向が認められ、最大で進行波としての水塊移動量の 2 割程度になることが分かる。そして、算定結果は、概略的には実験結果の変動傾向と一致するものの、定量的には共振度合いの予測が十分でないため、高めの予測になる傾向が強い。

図-10 は、越流量に及ぼす後壁の天端高さ h_c の影響について検討したもので、前出の結果に加えて $h_c=2$ cm, 4 cm のときの結果についても合わせ示してある。この図より、越流量は、当然のことながら後壁天端が静水面に一致するとき最も大きく、天端を高くすると減少する傾向にある。ただし、 $h_c=2$ cm, 4 cm のときの越流量にはそれほど有意な差は見られず、越流量はある程度の突出高があるときには天端高さによってそれほど鋭敏に影響されないと判断される。

(2) 波浪制御効果

図-11, 12 は、図-2 に示す越流型堤体で後壁天端を静水面に一致させたとき ($h_c=0$ cm) および後壁天端を $h_c=-5$ cm と静水面下にしたときの反射率 C_r と透過率 C_t の B/L による変化を示す。これらの図中には、減衰波理論による算定結果についても示すが、線形理論であるため、 $h_c=0$ cm の条件では越流部よりの透過波の影響は考慮できない。

図-11 より、反射率の実験結果は、越流効果を見捨てた算定結果と概略的に一致している。そして、 $h_c=0$ cm

の条件では、図-9に示す越流量が比較的大きくなる B/L の条件下でも算定結果との一致度がよいことから、越流が生じることによる反射波の低減効果への影響はほとんどないといえる。しかしながら、 $h_c = -5$ cm の条件では、実験、算定結果の両者ともに $h_c = 0$ cm の結果と比較して反射率の絶対値は増加する傾向が見られ、後壁天端を静水面下にするこの影響は大きい。

$h_c = 0$ cm のときには、図-9と図-11との比較から、越流量が大きくなる波条件は反射率が比較的小さくなる条件にほぼ一致しており、反射波を制御して越流量を増大させることが可能になる。

一方、図-12に示す透過率は越流量の増大および後壁天端の低下に伴ってやはり増加する傾向にあり、 $h_c = 0$ cm の場合でも $C_t = 0.3$ 程度と有意な大きさになる。特に、後壁天端を静水面下に設定する影響は大きい。

図-13は、越流を許すことによる透過波の増大抑制を目的として図-3に示すように堤体の港内側にさらにカーテン壁を設けたときの透過率について示す。図中には、 $h_c = 0, -5$ cm の両者の結果について示す。図-12の結果との比較から、港内側にカーテン壁を設けると、透過率は全体的に低下する傾向が見られる。ただし、 $h_c = -5$ cm のときにはやはり透過率は比較的高いままであり、後壁天端を静水面下に設定する影響は大きいといえる。

5. 結 語

(1) 異吃水2重式カーテン防波堤の通水機能を高めるため、後面壁下部の通水開口長を広く設定する場合、開口部上端に一致させて水平版を設けると水平版がないときに比較して透過波を有効に低減できる。このとき反射波の低減効果も開口部がない場合と同程度に維持できる。

(2) 上部越流型防波堤の越流量は、遊水室内でのピストンモード波動運動の増幅度に比例して増大する傾向が見られ、後面壁の天端高さを静水面位置程度に設定す

ると、その増幅度が大きな比較長周期の条件下では、海水交換に有効な越流量が期待できる。このとき、原理的に反射波の低減効果も顕著で、波を制御して海水交換が可能になる。

(3) 上部越流型防波堤の越流量は、減衰波理論と堰の越流公式を組み合わせた理論算定法によりほぼ予測できる。

参 考 文 献

- 岡本 博・森下敏夫 (1985): 海水交換機能を持つ弁式有孔堤について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 540-544.
- 小田一紀・真柴平宣之・中西昭人・田中彬夫 (1995): 波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1116-1120.
- 猿川 弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲美 (1993): 消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 971-975.
- 塩崎禎郎・磯崎総一郎・中村滋・堀内博 (1996): 海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1226-1230.
- 下迫健一郎・近藤充隆・藤堂ひろみ・福井正幸・高橋重雄 (1999): 越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1096-1100.
- 中村孝幸・井手義彦 (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・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝 (1999): 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 797-800.
- 道下 勲・国栖広志・葛原 徹 (1988): 鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 577-581.
- 森田修二・出口一郎 (1999): スロープ水路を有する透過性防波堤に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1101-1105.
- 柳瀬知之・谷野賢二・水野雄三・梅沢信敏・桑原伸司 (1991): 有孔堤の海水交換機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 856-860.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文 (1987): 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 海岸工学論文集, 第34巻, pp. 675-679.
- 蔣 勤・高橋重雄・珠久正憲・磯部雅彦 (2000): L型カーテンウォールの波浪制御特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 81-86.