

# 傾斜板列型二重式カーテン防波堤に 作用する波力について

## WAVE FORCES ON A DOUBLE-WALLED BREAKWATER WITH AN INCLINED PLATE ARRAY AS A FRONT WALL

中村孝幸<sup>1</sup>・高木伸雄<sup>2</sup>・中山哲巖<sup>3</sup>・河野 徹<sup>4</sup>・菊地一郎<sup>5</sup>  
Takayuki NAKAMURA, Nobuo TAKAKI, Akiyoshi NAKAYAMA, Tohru KOHNO  
and Ichro KIKUCHI

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 農博 (独)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

<sup>3</sup>正会員 (独)水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部水理研究室長

<sup>4</sup>正会員 復建調査設計 (株) 研究開発部長

<sup>5</sup>日立造船 (株) プラント事業部

In order to mitigate secondary effects caused by high reflection waves from a conventional curtain-walled breakwater, a new type of breakwater consisting of two different walls was proposed. One wall is an impermeable curtain wall and located on the shore side of the breakwater. The other is consisted of an array of inclined plates with the same gap and located on the offshore side. By using the Helmholtz mode wave resonance between the two walls, enhancement of the vortex flow is realized. In this paper, characteristics of wave forces on the front and rear walls as well as uplift forces on the superstructure were examined by both the physical model tests and the theoretical computations. The damping wave theory was used for the theoretical examinations. Especially, applicability of the theory to the estimation of the wave forces influenced by the strong vortex formations was extensively examined.

*Key words; Wave forces, estimation method, double-walled breakwater, Inclined plate array*

### 1. まえがき

既に、著者ら<sup>1</sup>は反射波災害の防止を目的として、異吃水の二重式カーテン防波堤を提案し、その効果やエネルギー逸散機構などについて明らかにしてきた。また、瀬戸内海のように潮位差の大きい海域でも効果的に反射波が低減できるように、前面カーテン版に代わり傾斜板列を用いる二重式防波堤を提案し、その効果などを確認してきた<sup>2)</sup>。

本研究では、このような二重式防波堤に作用する波力の特性を、減衰波理論<sup>3)</sup>による理論解析および水理模型実験による実証的な検討の両面から明らかにする。この際、実際設計で必要となる前面傾斜板列壁と後面壁に作用する波力の位相関係や上部工に作用する衝撃揚圧力との位相関係などについても考察した。

### 2. 実験装置および実験方法

実験は、長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元造波水槽を用いて行った。模型堤体は、図-1に示すように傾斜板列よりなる透過性の前面壁と不透過性の後面壁

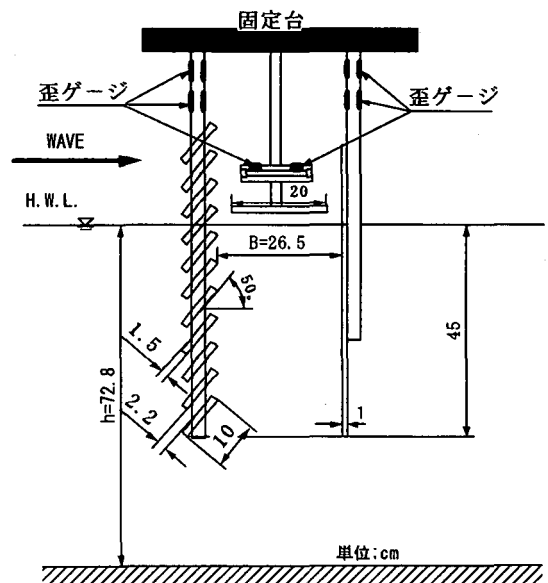


図-1 傾斜板列型二重式カーテン防波堤

で構成されている。これらの壁体は、波力計を兼ねた上部固定式の片持ち梁で支持した。これら波力計は、そ

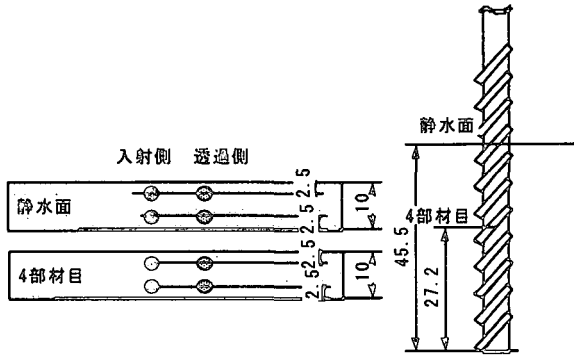


図-2 前面傾斜板への波圧計の設置状況

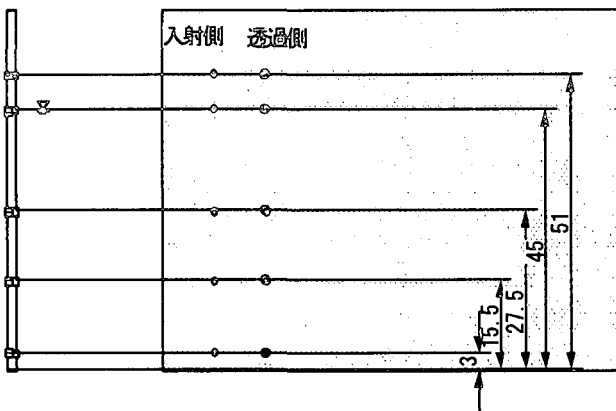


図-3 後面壁への波圧計の設置状況

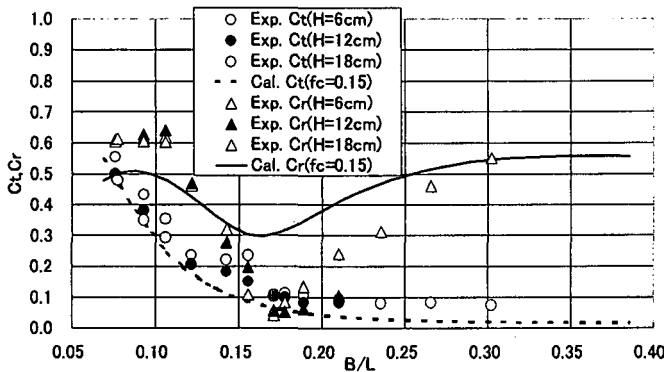


図-4 透過・反射率のB/Lによる変化  
(高潮位:  $h=72.8\text{cm}$ ,  $d=45\text{cm}$ ,  $B=26.5\text{cm}$ )

れぞれ4枚の歪ゲージの引算回路で構成され、壁体に作用する水平力が測定できるようにしてある。また、上部工を想定した上床板を設けた実験も行い、このとき上床板に作用する揚圧力についてもやはり上部固定の片持ち梁を兼ねた波力計により測定した。このときの上床板のクリアランスは高潮時における上部工のクリアランスを考えて2cmに固定した。また、現地構造物では遊水室内上部の空気が逃げやすい構造にしてあることから、上床板の左右には空気抜きのための開口部を設けた。

波力測定の精度を左右する波力計の固有振動数は、水平波力計についてはほぼ7Hz、揚圧力計は30Hzであることを確認している。水平波力は、ほぼ作用波と同程度の周期で正弦波的に振動することから上記のような性能で十分と判断した。また、揚圧力は、衝撃性の波力であることを考慮して比較的剛な波力計を使用した。上記の性能でも十分とは言えない面もある。

模型堤体は、波変形と作用波力の測定を目的として製作しており、剛性が高くしかも軽量のアルミ製とした。傾斜板列には厚さ1.5cmのアルミ板を12枚、後面カーテン壁および上床版には厚さ1cmのアルミ板を用いた。このとき、傾斜板列の向きは、入射波の作用方向から見て上向き50°とした。

波力実験では、図-2, 3に示すように、壁体に作用する波力分布についても検討できるように計18台の波圧計を設置した。このとき、前面傾斜板列については、静水面付近に位置する傾斜板と水面下4番目の傾斜板にそれぞれ4台の波圧計を、後面カーテン壁には裏表にそれぞれ5台ずつの波圧計を設置した。

前後壁の間隔Bは、従来の成果<sup>2)</sup>を参照して反射波の低減効果が高いことが確認されている $B=26.5\text{cm}$ に固定した。

模型堤体の設置水深hは、現地で3m程度の潮位変化を想定して、異なる3種類の水位を選定して反射・透過率を測定した。一方、波力測定では、危険側を想定して図-1に示す高潮位のための1種類に限定した。

模型に作用せしめた入射波の条件は、波高Hが6cm, 12cm, 18cmの3種類、周期Tが0.75s~1.6sの範囲の12種類である。なお、ここで想定した模型縮尺は、約1/13程度である。

## 2. 透過・反射率

傾斜板列型二重式防波堤の各潮位に対する反射・透過率の結果については、前報<sup>2)</sup>にて詳細に紹介してあることから、ここでは波力実験時に採用した高潮位時に対する結果のみを示す。

図-4は、この水位条件のときの透過率Ct、反射率CrのB/L(B:遊水室幅、L:波長)による変化を示す。図中には、減衰波理論<sup>3)</sup>による算定結果についても併せ示す。このとき、線形減衰係数 $f_c$ には、 $f_c=0.15$ が用いである。

これらの図より、透過率Ctはほぼ減衰波理論により推定されるようにB/Lの増大、すなわち短周期の条件になるほど減少する傾向が認められる。一方、反射率Crは、特定のB/Lの条件下で一旦低下する変化を示し、この反射率が極小となる条件はほぼ減衰波理論による算定結果と一致するものの、反射率の絶対値は実験結果の方がより小さく現れるなどの相違も見られる。

なお、傾斜板列型二重式防波堤では、2枚の不透過カーテン版で構成される異吃水二重式カーテン防波堤に比較すると、潮位差による反射波低減効果の変化が少

なくより安定した消波性能をもつことが確認されており<sup>2)</sup>、ここに付記しておく。

### 3. 水平波力および波圧

#### (1) 傾斜板列に作用する波力と波圧

図-5は、前面傾斜板列に作用する水平波力 $F_f$ の正負ピークに着目して、それらの遊水室幅と波長の比 $B/L$ による変化を示す。水平波力 $F_f$ は、次式による無次元波力 $F_f^*$ で表示してある。

$$F_f^* = F_f / (\rho g H b d) \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ :水の密度、 $g$ :重力加速度、 $b$ :模型堤体の堤長、 $d$ :吃水深である。 $F_f^+、F_f^-$ はそれぞれ波の進行方向および逆方向に作用する波力ピークに対応する。

図より、波力強度 $F_f^*$ は一旦特定の $B/L$ で極大を示し、それより短・長周期側になるにつれ減少する傾向が確認できる。この極大となる周期条件は、反射波が低減する周期条件と概略的に一致しており、その影響によると推測される。

また、減衰波理論による算定結果と実験結果を比較すると、波力強度 $F_f^*$ が極大を示す付近よりも短周期側では、ほぼ両者は一致するものの、それより長周期側では測定波力の方が大きく、十分な予測とはいえない。これは長周期側で卓越しやすい傾斜版列周囲の渦流れによる流体力が増大するためと考えられる。そして、減衰波理論では、渦流れのような局所的な流体現象に起因する流体力の予測に対しては十分とはいえない。

次に、図-6、7は、傾斜板列を構成する部材中ではほぼ静水面位置にある部材と水面下4部材目の2部材に作用する波圧合力 $\Sigma p$ の $B/L$ による変化を示す。 $\Sigma p$ は、傾斜板の前後面に取り付けられた波圧計による前後差圧を時系列的に求め、これを基にして、さらに代表長を乗じて計算される単位長幅当りの波圧合力である。図中の波圧合力強度 $\Sigma p^*$ は次式の定義によるもので、いわゆる単位面積あたりに換算したときの平均波力強度に相当する。

$$\Sigma p^* = \Sigma p / \rho g H l_p \quad (l_p: \text{傾斜版幅}) \quad (2)$$

これらの図より、各部材に作用する波圧合力の強度は、やはり上記の傾斜板列全体に作用する波力と同様に特定の $B/L$ で極大を示す。そして、水面下第4部材の波力は、静水面付近に位置する部材のそれと比べて1/3程度と小さいことが分かる。減衰波理論による算定結果と比較すると、水面の上下降があり、衝撃性の波力になりやすい水面付近に位置する部材では、算定波力は測

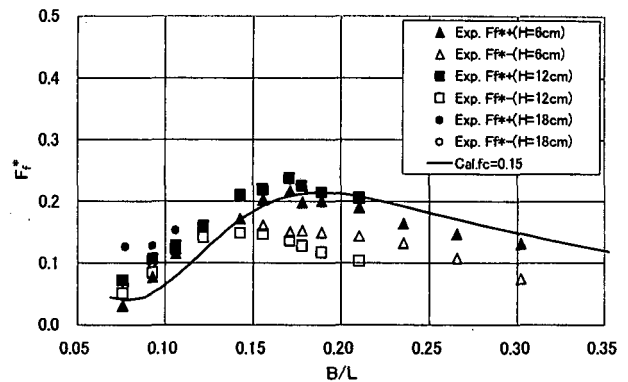


図-5 前面傾斜板列壁に作用する水平波力 $F_f^*$ の $B/L$ による変化 ( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

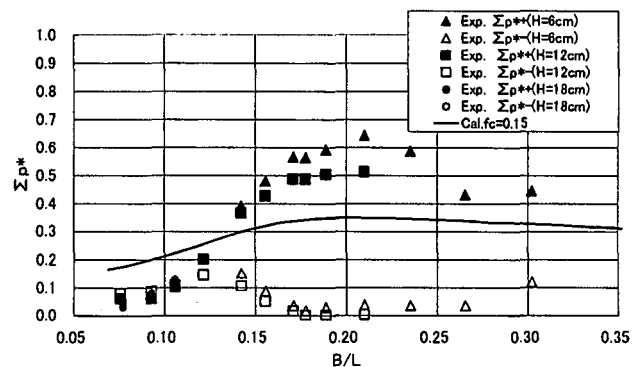


図-6 静水面付近に位置する傾斜版に作用する波圧合力 $\Sigma p^*$ の $B/L$ による変化 ( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

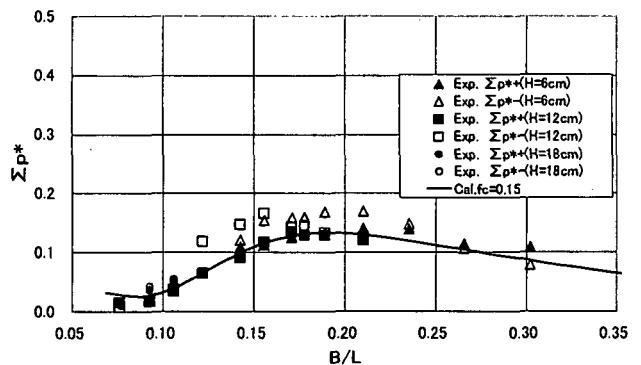


図-7 水面下第4傾斜版に作用する波圧合力 $\Sigma p^*$ の $B/L$ による変化 ( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

定波力よりも小さくなり、この傾向は $B/L$ が0.15よりも大きな短周期側で顕著である。一方、水面下第4部材については、算定結果と実験結果はほぼ一致しており、傾斜板列のような複雑な構造条件でも、傾斜板に作用する波力がほぼ推定できることが分かる。なお、実験結果では、押し波時の波力よりも、引き波時の波力の方が大きくなる傾向が認められ、興味深い。このような原因については、今後さらに検討を進めていきたい。

## (2)後面壁に作用する波力と波圧

図-8は、後面壁に作用する水平波力 $F_b$ の $B/L$ による変化を示す。縦軸には、前面傾斜板列のときと同様に次式による無次元波力 $F_b^*$ が採用してある。

$$F_b^* = F_b / \rho g H b d \quad (3)$$

この図より、後面壁に作用する波力 $F_b^*$ は、 $B/L$ の小さな長周期条件になるにつれて増大し、その変動傾向は減衰波理論による算定結果とよく一致している。そして、最も長周期の条件を除けば、定量的にも両結果はほぼ一致している。図-9は、前面傾斜板列を取り除いた単一カーテン壁の場合の水平波力との比較を示す。この図より、 $B/L$ の小さな長周期波では両堤体への作用波力に有意な差異は認められず、前面傾斜板列の遮蔽効果が認められるのは比較的短周期の条件に限られることが分かる。このように、不透過壁の前面に傾斜板列を設置する効果は、反射波の低減のみならず、短周期波に限定されるが作用波力についてもその強度を低減できるという利点をもつことがわかった。

## (3)全水平波力

図-10は、堤体全体に作用する水平波力 $F_t$ の $B/L$ による変化を示す。図中の無次元量 $F_t^*$ は式(3)と同様な無次元化の定義による。この図より、堤体全体に作用する水平波力の強度 $F_t^*$ は、実験結果および算定結果ともに、 $B/L$ の小さな長周期側になるにつれ増大する。この傾向は、後面壁に作用する波力と同様であり、主に不透過壁である後面壁への作用波力が堤体全体への作用波力において卓越した影響度をもつと考えられる。そして、 $B/L$ が0.15~0.20の条件では、前面傾斜板列の水平波力が極大になるにもかかわらず、全体波力ではそれほど明確なピークは見られず、前後壁に作用する波力ピークが時間遅れをもって現れることが推察される。

図-11は、このような波力ピークの位相差 $\delta_1$ を示す。この位相差は、前面傾斜板列に作用する波力が極大を示してから、後面壁に作用する波力が極大となるまでの遅れの時間を位相角で表してある。図中には、遊水室幅を波速で除して得られる進行波理論に基づく位相差 $\delta_2$ および減衰波理論による同様の位相差 $\delta_3$ についても比較のため示してある。この図より、まず前後壁に作用する水平波力の位相差は、 $B/L$ に伴い増大することが確認できる。そして、測定された位相差の絶対値は、 $\delta_2$ と $\delta_3$ の中間にあり、必ずしも進行波を想定した位相差とは一致しないことが分かる。これは、遊水室内で卓越するピストンモードの水位変動の影響によると考えられる。

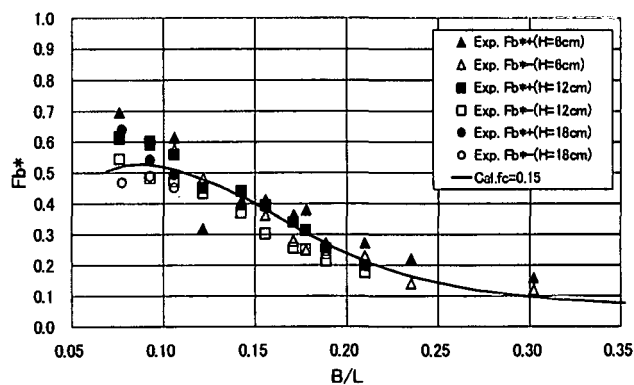


図-8 後面壁に作用する波力 $F_b^*$ の $B/L$ による変化  
( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

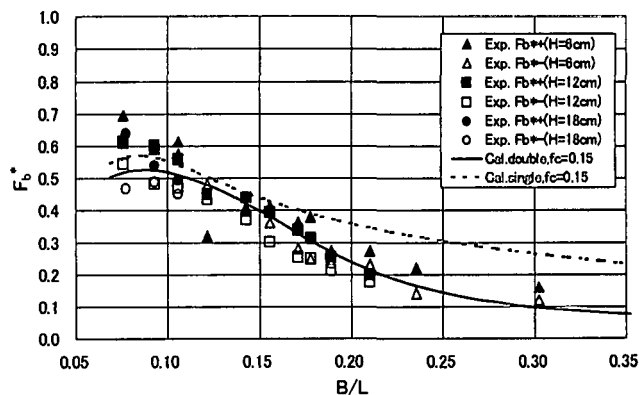


図-9 後面壁に作用する波力 $F_b^*$ の単一カーテン堤との比較  
( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

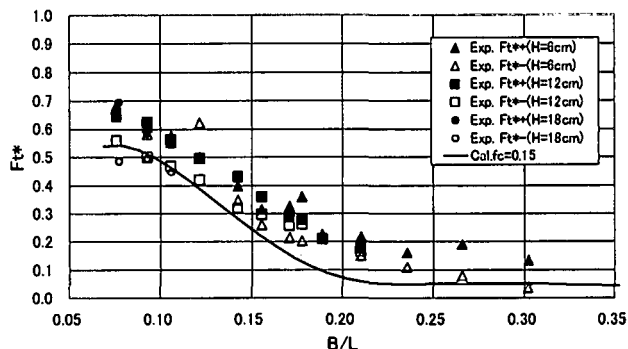


図-10 堤体全体に作用する水平波力 $F_t^*$ の $B/L$ による変化  
( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

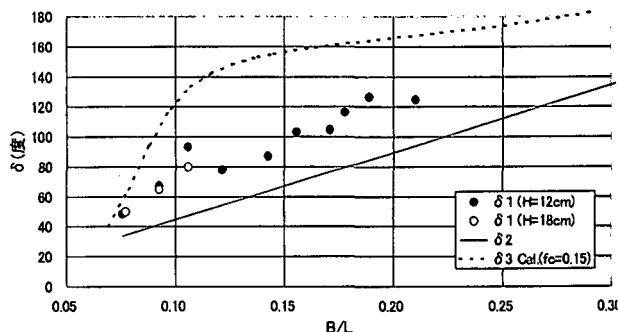


図-11 前後壁の極大波力の位相差 $\delta$ の $B/L$ による変化  
( $d=45\text{cm}, B=26.5\text{cm}, h=72.8\text{cm}$ )

## 4. 揚圧力

### (1) 揚圧力の大きさ

図-12は、上部工を模擬した遊水室内上部の上床版作用する揚圧力の正ピーク(上向き)のB/Lによる変化を示す。図中に示す無次元揚圧力 $F_{up}^*$ は次式の定義による。

$$F_{up} = F_{up}^* / \rho g H A \quad (A: \text{上床版の面積}) \quad (4)$$

これらの図より、揚圧力はB/Lの小さな長周期側になるにつれて増大することがわかる。これは、遊水室内におけるピストンモードの波動運動がこのB/Lの条件下で同調現象を示し、最大で増幅率が2弱程度になるためである<sup>2)</sup>。そして、揚圧力強度の絶対値は、設計で重要になる高波高の条件下では、最大で0.9程度の強度であることが確認できる。ここでは割愛するが、揚圧力の時間波形は、作用時間の短い衝撃性の波形に近いものであったことを確認している。

### (2) 揚圧力と水平波力の位相関係

図-13は、水平波力と揚圧力の出現ピークの位相関係のB/Lによる変化を示す。図中には、前後壁の水平波力の位相差 $\delta_{bf}$ および前面壁の水平波力と揚圧力の位相差 $\delta_{uf}$ の両者がプロットしてある。この図より、 $\delta_{bf}$ と $\delta_{uf}$ は、B/Lに伴い増加することや両位相差の間には一定の関係があることが認められる。そして、 $\delta_{bf}$ と $\delta_{uf}$ は、概略的に10~15度程度の差しかなく、工学的には後面壁波力と揚圧力はほぼ同時に作用すると判断してもよいと考えられる。なお、上床版に作用する揚圧力は、その発生機構から考えても分かるように、作用時間の短い衝撃性の波力であるのに対して、水平波力は作用波の周期で変動する正弦波的な波力であることに注意する必要がある。

## 5. 結語

(1) 前面壁を傾斜板列とする二重式カーテン防波堤では、前後壁に対する無次元水平波力は、異なるB/Lの条件下で極大になる。そして、前面壁では後面壁と比較して、短周期の条件下で極大になる傾向が見られ、その周期条件は反射波が極小となる条件にほぼ一致する。

(2) 傾斜板列型二重式カーテン防波堤では、前後壁に作用する水平波力の間には有意な位相差があり、全体波

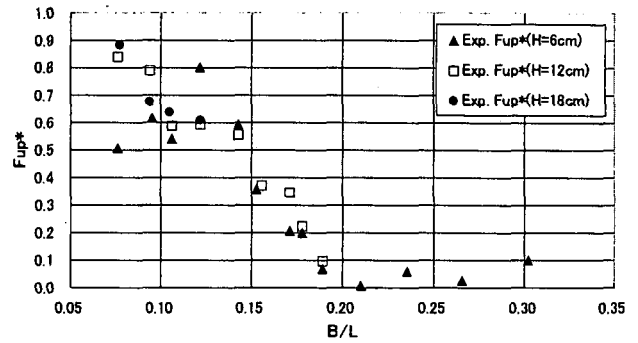


図-12 上床版に作用する揚圧力 $F_{up}^*$ のB/Lによる変化 (d=45cm, B=26.5cm, h=72.8cm)

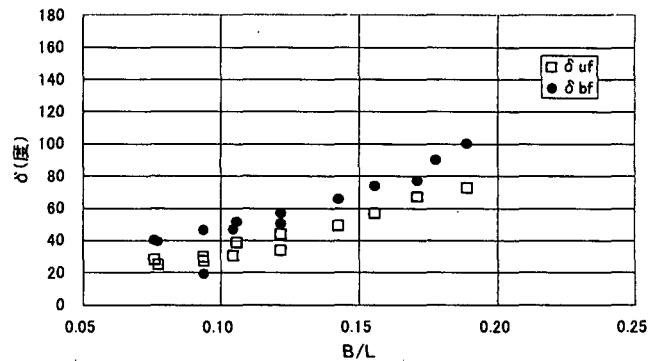


図-13 各波力ピークの出現位相の関係 (d=45cm, B=26.5cm, h=72.8)

力を推定するときこの位相差が重要になる。ただし、透過波が増大する長周期側では、後面壁波力は、前面傾斜板列壁のそれより卓越した大きさを示すようになるため、前面壁波力の重要度は低下する。

(3) 二重式カーテン防波堤の上部工に作用する揚圧力は、作用時間の短い衝撃性の波力であり、ほぼ後面カーテン壁に作用する水平波力が極大となると同時に作用するため、設計に際して注意が必要である。

(4) 減衰波理論により、傾斜板列の前面壁および後面カーテン版に作用する水平波力が概略的に推定できる。

## 参考文献

- 1) 中村孝幸・神川裕美・河野徹・楨本一徳: 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, 1999.
- 2) 中村孝幸・菊地一郎・神川裕美・河野徹・楨本一徳: 傾斜版列型二重式カーテン防波堤の構造形式と波浪制御効果について, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.31-34, 2000.
- 3) 中村孝幸・井手善彦: 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, pp177~182, 1997.