

垂下板式反射波低減工の消波効果に及ぼす 上部工の影響と作用波力に関する研究

WAVE FORCE CHARACTERISTICS ON A BARRIER-TYPE REFLECTION DISSIPATER AND SUPER-STRUCTURE EFFECT ON WAVE REFLECTIONS

西川嘉明¹・小野塚孝¹・加藤孝輔¹・神野充輝¹・中村孝幸²
Yoshiaki NISHIKAWA, Takashi ONODUKA, Kousuke KATOU, Mitsuteru JINNO
and Takayuki NAKAMURA

¹正会員 榊三柱 (〒135-0034 東京都江東区永代一丁目3-4)

²正会員 工博 愛媛大学助教授 環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町三番)

It has become known that a vertical-barrier-type reflection dissipater is more effective than the conventional perforated-wall-type dissipater to reduce reflected waves from the sea walls, especially for comparatively long waves. The dissipation mechanism of reflected waves is to enhance vortex flows around a vertical barrier excited by the piston-mode wave resonance in the water chamber. In this study, wave force characteristics on the barrier-type dissipater were examined extensively. Based on both the physical model tests and the theoretical computations by use of the damping wave theory, the estimation method of peak wave forces on each wall and total resultant forces was precisely discussed. For the practical design, effect of the vertical position of capping plates above the water chamber on the wave reflection and uplift force was also examined experimentally.

Key Words: reflection wave dissipater, vertical barrier, wave force, doubly walled dissipater, piston-mode wave resonance, super-structure effect

1. 序論

既に著者ら¹⁾は、図-1に示すような前面を垂下板で水面付近のみを遮断した遊水室をもつ消波護岸を提案した。これは、従来のスリット式構造物や直立消波ブロック工などに代わるもので、構造形式が単純であり、しかも反射波の低減に最も有効な遊水室幅(堤体幅)は従来の消波工に比較してほぼ半減できるなど、建設コストの削減が可能な構造形式と考えられる。また、垂下板を2枚にした二重の遊水室をもつ構造にすると、反射波の低減に有効な周期帯を拡大できることが確認されている。

この新型消波護岸を实际場に適用する際には、構造設計で不可欠な作用波力や波圧分布の水理学的な特性について明らかにしておく必要がある。また、このような遊水室をもつ消波工では、上部空間の有効利用のために上床版を設けるのが一般で、それに働く揚圧力の特性の把握などが不可欠と考えられる。この消波工の作用波圧・波力の特性および上床版設置に伴う反射波低減効果への影響について実験と算定結果により検討する。なお、算定には減衰波理論²⁾を用いた。

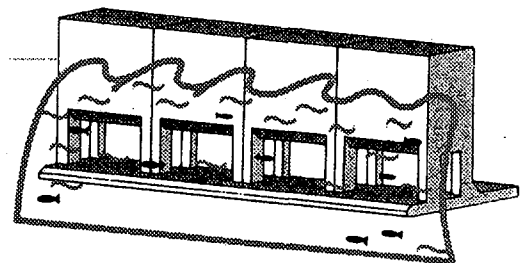


図-1 新型消波護岸
(垂下板式反射波低減工)

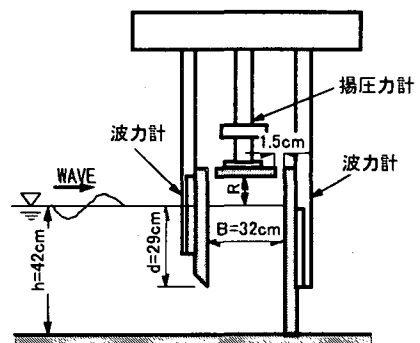


図-2 波力計および揚圧力計の設置図
(単一垂下板式の反射波低減工)

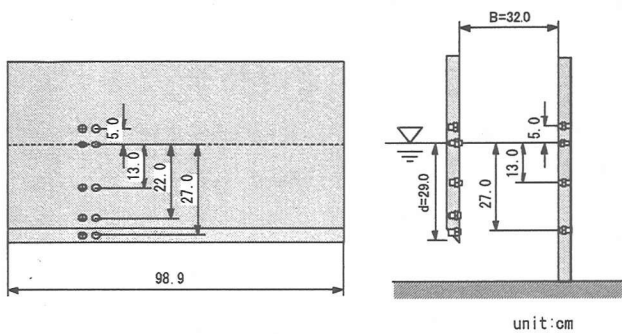
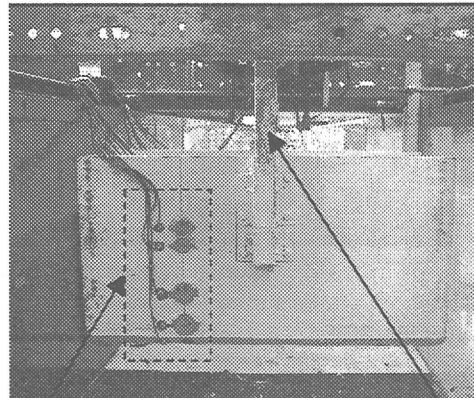
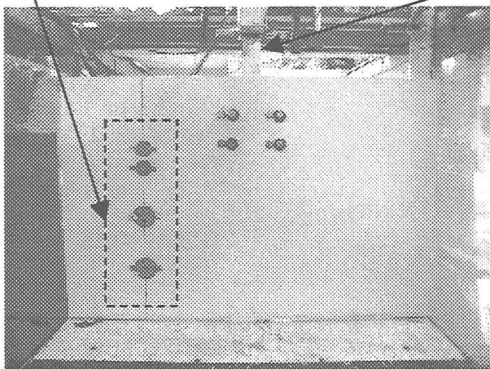


図-3 波圧計設置位置



波圧計 垂下板(表裏に計10台) 波力計



直立壁(前面に4台)

写真-1 波力計および波圧計の設置状況

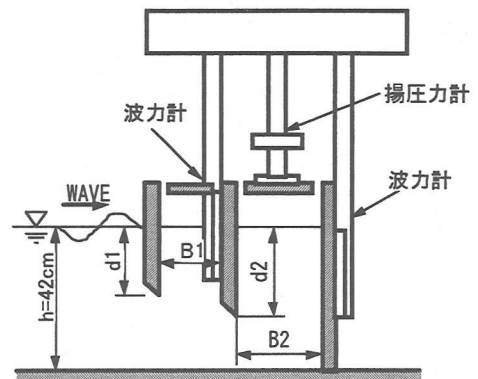
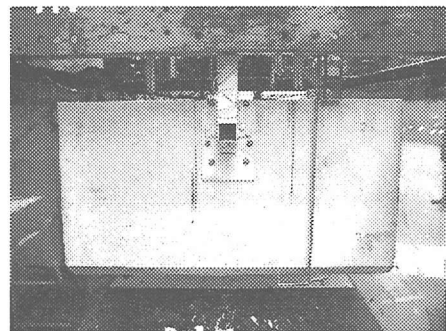
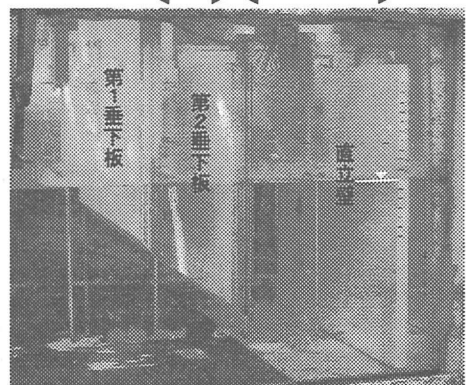


図-4 波力計および揚圧力計の設置図
(二重式垂下板構造の反射波低減工)



前面

第1遊水室 第2遊水室



全体

写真-2 二重式垂下板構造の模型堤体

表-1 模型条件と実験条件

		scale 1/12				
	模型条件	クリアランスF	入射波高H	周期T	水深h	
単一式構造	B=32,d=29	上床版なし	12,20	0.9~2.5s	42	
		6				
		3				
二重式構造	B1=22,d1=21 B2=32,d2=29	上床版なし	12,20	0.9~2.5s	42	
		3				

unit:cm

あり、モーメントの引算回路により壁に作用する水平波力が検出できるようにしてある。

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、垂下板の表裏に10台、直立壁の表面に5台、計15台の波圧計を図-3、写真-1に示すように配置した。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽と実験模型

実験は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ25m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いて行った。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方式のピストン型造波装置が、他端には端部からの再反射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。

実験模型は、図-2に示すように遊水室幅 $B = 32\text{cm}$ 、垂下板吃水深 $d = 29\text{cm}$ 、水深 $h = 42\text{cm}$ と一定にし、縮尺を1/12とした。垂下板と直立壁に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

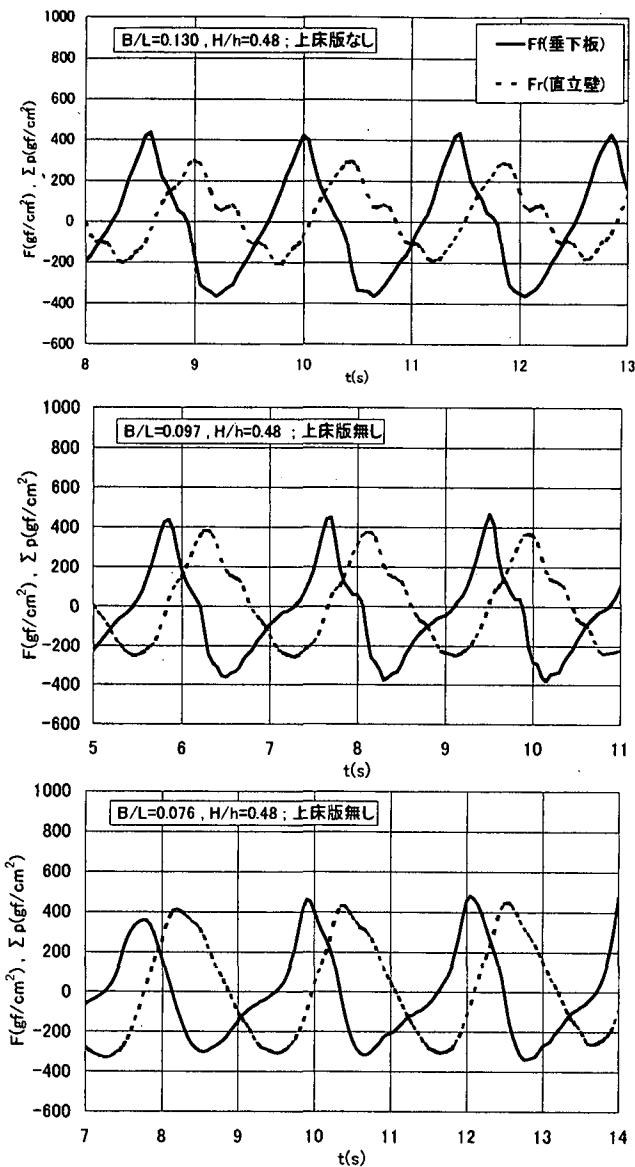


図-5 波力の時系列(上床版なし)

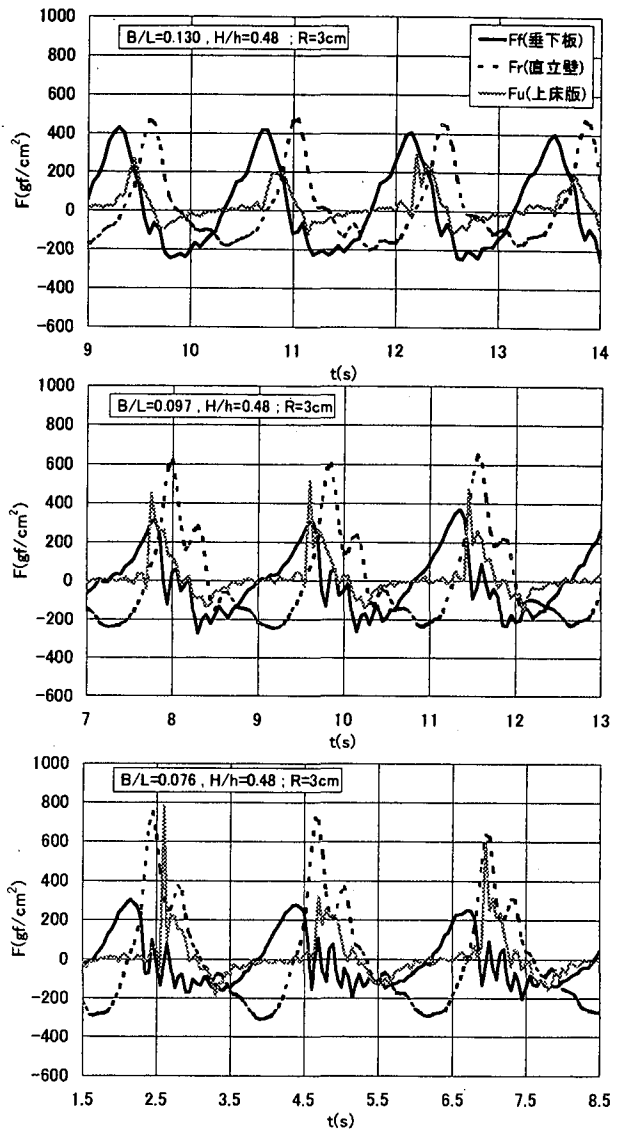


図-6 波力の時系列(上床版あり:R=3cm)

また、上部工を想定した上床版は、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、固有振動数がほぼ50Hz程度以上となるように十分に剛な構造とした。そして、静水面からの距離(クリアランス) R を0cm, 3cm, 6cmの3種類に変化させることにより、上床版に働く揚圧力の特性について検討した。

なお、図-4、写真-2に示す二重式構造のときは、第2垂下板およびその背後の第2遊水室の上床版に作用する波力・波圧測定のみを行った。このときの第2垂下板吃水深 d_2 ・遊水室幅 B_2 は、単一式のときと同じ寸法で用いた。

(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4本を用いて、反射率および垂下板前面での水位変動を同時に測定した。

このときの実験諸量については表-1に示す。

3. 単一垂下板式の反射波低減工

(1) 波力・波圧の時間波形

図-5および図-6は、 $B/L=0.130, 0.097, 0.076$ における上床版のないときと上床版をクリアランス $R=3\text{cm}$ で設置したときの波力・波圧の時間波形を示す。図中には、垂下板および直立壁に作用する水平波力 F_f, F_r を示す。

上床版のないとき(図-5)は、垂下板および直立壁に作用する波力は、両者ともに非衝撃的な重複波性の波力に近いことがわかる。

次に、上床版を設置すると、図-6より、水平波力は作用時間の短い衝撃性の波形を含むようになり、この傾向は長周期側で顕著となる。また、上床版に働く揚圧力 F_u は、作用時間が短く、鋭いピークを示す衝撃性の波形であることがわかる。このため、設計の際には、上床版の設置位置による最大揚圧力の変化、垂下板および直立壁に作用する水平波力と揚圧力との位相関係が重要になると考えられる。

(2) 水平波力の特性

a) 垂下板および直立壁に作用する水平波力

図-7、図-8は、上床版のないときとクリアランス $R=3\text{cm}$ で設置したときの垂下板および直立壁に作用する水平波力 F_f 、 F_r の遊水室幅・波長比 B/L による変化を示す。なお、ここでの減衰波理論による算定結果では、上床版による影響は考慮していない。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 F_f^* 、 F_r^* で表示してあり、その定義は次式による。

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

$$F_r^* = F_r / \rho g H h \quad (2)$$

ここで、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 d : 垂下板吃水深、 h : 水深である。図中の 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である。

図-7より、垂下板に作用する水平波力 F_f^* の実験結果は、 $B/L=0.80\sim 0.90$ 付近で極大となり、それよりも短周期および長周期の条件においても算定結果より大きくなっており、減衰波理論による予測と一致しないことわかる。このように算定結果と異なる F_f^* が測定される理由としては、垂下板への波の遡上の影響や垂下板前後の水位変動の位相差等の影響が挙げられる。

また、クリアランス $R=3\text{cm}$ とすると、正ピーク $F_f^*_+$ は大きくなるが、逆に負ピーク $F_f^*_-$ は減少している。この理由としては、正方向の力はクリアランスによって変化しないが、逆向きの負方向の力は遊水室内での水位変動が上床版によって制限されるため減少すると考えられる。

次に、直立壁に作用する水平波力 F_r^* は、図-8より、定性的には、実験結果、算定結果ともに波条件が長周期になるにつれて増大している。 F_r^* の正ピーク $F_r^*_+$ の実験結果に着目すると、上床版のないときと比較して大きな値を示している。そして、 $B/L=0.085$ 付近で極大となり、これより短周期および長周期側の条件になるにつれて減少する傾向がみられる。

また、上床版を設置することにより $B/L=0.085$ 付近での $F_r^*_+$ の極大値が増大することも分かる。この原因は、遊水室内のピストンモードの水位上昇運動が上床版によって妨げられる際に、鉛直方向に行き場のない水塊が水平方向に作用することによるものと考えられる。これは実際に観測されており、その様子を写真-3に示す。 F_r^* については、長周期になるにつれて緩やかに増加する傾向にあり、正ピーク $F_r^*_+$ に比べてかなり小さい値を示している。

次に、実際設計で必要になるモーメントやせん断力を推定する上で不可欠な波力分布、すなわち垂下板の表裏における波圧の差 Δp の鉛直分布について

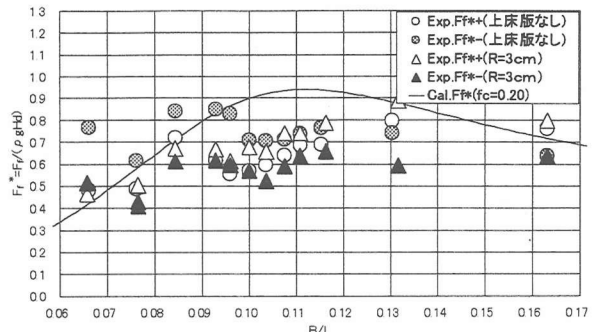


図-7 垂下板に作用する水平波力 F_f^* (入射波高 $H=12\text{cm}$)

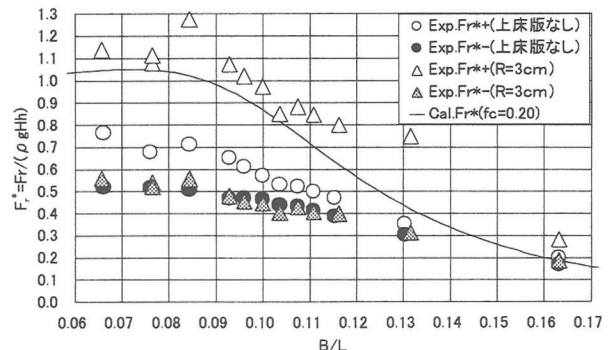


図-8 直立壁に作用する水平波力 F_r^* (入射波高 $H=12\text{cm}$)

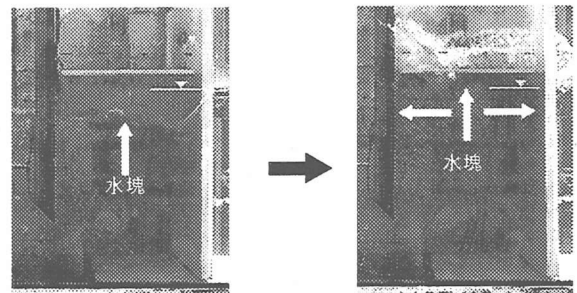


写真-3 水塊の前後壁への作用 ($R=3\text{cm}$; $B/L=0.085$, $H/h=0.49$)

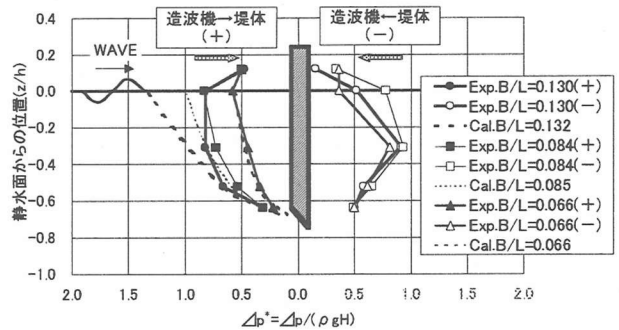


図-9 垂下板に作用する極大差圧強度 (上床版なし、入射波高 $H=12.0\text{cm}$)

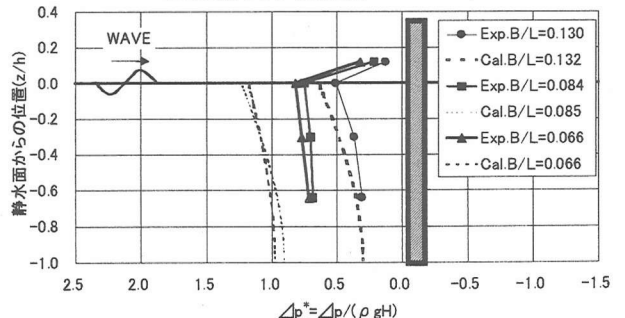


図-10 直立壁に作用する極大差圧強度 (上床版なし、入射波高 $H=12.0\text{cm}$)

検討してみる。

図-9, 10は, $B/L=0.130, 0.085, 0.066$ の3種類の波条件での, 垂下板および直立壁に作用する差圧 Δp の正負ピーク分布を示す。このとき, 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。

$$\Delta p^* = \Delta p / \rho g H \quad (3)$$

図-9より, 垂下板では, 差圧の正ピークは静水面で最大となり壁中心付近でも大きな値を示し, 水面上, 壁下端付近で小さくなり, 全体的には弓型の分布形状を示す。これに対して負ピークは, 板中心付近で最大となり, 板下端部では差圧強度はほぼ0.5と正ピークに比べて大きくなる傾向が見られる。これは, 逆流時に板の下端鋭角部付近に大規模な渦が形成されており, その影響によるものと考えられる。

また, 図-10より, 直立壁では, 静水面下ではほぼ様な分布になっており, 定量的には, 算定結果が実験結果より大きい。そして, このような傾向は長周期になると顕著になることから, 上記した水平波力の比較で算定結果が実験結果を上まわるようになると考えられる。

(3) 上床版に働く揚圧力

図-11は, 上床版に働く揚圧力 F_u の B/L による変化を示す。図中で示す揚圧力 F_u の無次元量 F_u^* は次式による。

$$F_u^* = F_u / \rho g H A \quad (4)$$

ここで, ρ :水の密度, g :重力加速度, H :入射波高, A :上床版の面積である。この図より, 揚圧力は $B/L=0.085$ で最大となることが分かる。そして, この条件は, 遊水室内での平均波高 H_c の極大となる B/L とほぼ一致しており¹⁾, ピストンモード振動の増大により, 揚圧力が増加することがわかる。そして, クリアランスが小さくなるほど, F_u^* が大きくなるのは, 上床版が静水面に近い位置にあるほど上昇速度が速いことによると推測される。また, $B/L=0.085$ 付近は, 垂下板や直立壁に作用する水平波力が一旦極大となる条件とも一致している。

(4) 全水平波力

以上では, 垂下板式反射波低減工を構成する垂下板および直立壁に分けて, 個々の部材に作用する波力・波圧について検討してきた。しかし, 実際設計では, 現地に設置した際, 来襲波による滑動・転倒の危険性を防ぐため, 構造物全体に作用する波力を知る必要がある。ここでは, 垂下板および直立壁で構成される構造物全体に作用する全水平波力 F_t について検討する。

図-12は, 入射波高 $H=12\text{cm}$ のときの同時全水平

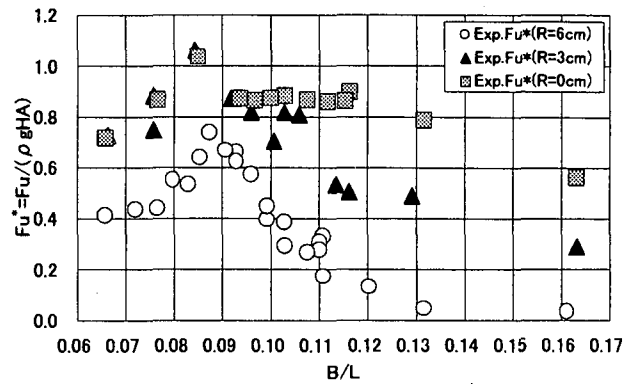


図-11 上床版に作用する揚圧力 F_u^* ($H=12\text{cm}$)

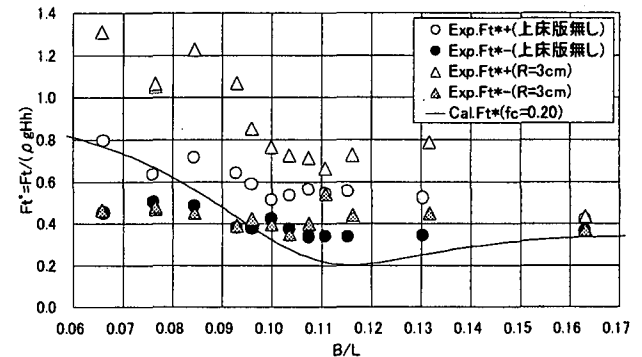


図-12 全水平波力 F_t^* ($H=12\text{cm}$)

波力 F_t の B/L による変化を示す。縦軸には, 水深で無次元化した F_t^* ($= F_t / \rho g H h$)が用いてある。これら図より, 正ピーク F_t^{*+} は, 短周期から長周期の波条件となるにしたがって緩やかに増加するが, 負ピーク F_t^{*-} は, ほぼ一定値を示す。そして, 算定結果よりも実験結果の方が大きくなる傾向が強く, 減衰波理論による予測では十分とは言い難い。

4. 二重式垂下板構造の反射波低減工

(1) 第2垂下板に作用する水平波力

図-13は, 第2垂下板に作用する水平波力 F_{t2} の実験結果と算定結果を示す。図中には, 上床版のない単一垂下板式反射波低減工の垂下板に作用する水平波力の結果も併せて示す。単一式と比較するため横軸には $B_2/L (= B/L)$ を, 縦軸には極大水平波力 F_{t2} の無次元量 $F_{t2}^* (= \rho g H d_2)$ を採用してある。

この図から, 第1遊水室幅 $B_1=22\text{cm}$, 吃水深 $d_1=21\text{cm}$ の二重式垂下板構造では正ピーク, 負ピークともに $B_2/L=0.14$ 付近で極大となることがわかる。そして, この条件は第1遊水室内の波高が極大となる条件であると考えられる。この傾向は, 減衰波理論による算定結果においても認められるが, 絶対値については差異が認められる。また, 単一垂下板式低減工の垂下板に作用する水平波力と比較すると, 二重式構造とすることにより, 第2垂下板の作用波力は, 1割~4割程度低下できることが確認できる。

(2) 直立壁に作用する水平波力

図-14は, 上床版のないときの後部直立壁に作用する水平波力の正ピーク F_{R^*+} , 負ピーク F_{R^*-} の B

2/Lによる変化を示す。図中には、単一垂下板式低減工の結果も併せて示す。これらの図から、正ピーク、負ピークともに $B2/L (= B/L)$ の大きな長周期側になるにつれて F_r^* は増大している。そして、算定結果は実験結果に比べて過大評価となる傾向がある。また、単一式低減工のときの F_r^* と比較すると、二重式にすることにより、全体的に多少低下する傾向が認められる。

5. 消波効果に及ぼす上床版の影響

図-15, 16は、単一および二重の垂下板式反射波低減工に上床版を設置したときの反射率 C_r の実験結果と算定結果を示す。これらの図より、上床版の有無にかかわらず定性的には、特定の B/L で極小となる傾向は同じである。しかし、定量的には、上床版のない状態から上床版を設置しクリアランスを $R=6\text{cm}$, 3cm , 0cm と順次小さくするにつれて反射率 C_r の極小値は増加する。このことは、ピストンモードの波浪共振により垂下板下端部で形成される渦流れの規模がクリアランス R の大きさに依存するためと考えられる。つまり、上床版を設置することにより、ピストンモードの波浪共振は妨げられ、その結果、垂下板下端部で発生する渦流れが小規模になるため、逸散エネルギーが減少すると考えられる。このことは、実験観測においても確認済みである。以上の検討から、遊水室内に上床版を設置すると、その設置位置が水面に近くなるほど反射率 C_r の極小値は増大することが判明した。

結論

- 1) 垂下板ならびに後部直立壁に作用する水平波力は、入射波高のみならず遊水室幅 B と波長 L の比(B/L)により変化し、それらは互いに異なる B/L による変化特性を示す。
- 2) 上床版のクリアランスが小さくなると、垂下板に作用する水平波力の正方向(入射方向)のピーク値は増大する。これは、上床版により、遊水室内での水位変動が制限され、負方向の水平波力が減少するためである。
- 3) 上床版に働く揚圧力は、作用時間の短い衝撃性の波力であり、後部直立壁に作用する水平波力とほぼ同位相で極大となるため、設計に際して注意する必要がある。
- 4) 単一遊水室の垂下板式反射波低減工および二重遊水室のそれでは、上部工を模擬した水平床版を遊水室内の上部に設けると、上床版のないときに比較して、反射率の極小値は増大する傾向にある。そして、この傾向は上床版と水面との距離 R (クリアランス)が小さくなると強くなる。これは、遊水室内でのピストンモードの波浪共振が上床版により妨げられ、その結果、垂下板下端部での渦流れが小規模になり、逸散エネルギーも減少するためである。

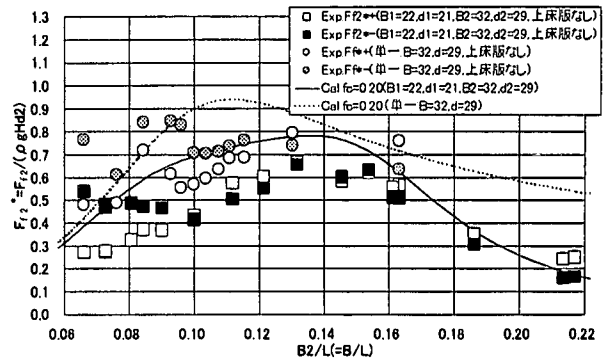


図-13 第2垂下板に作用する水平波力 F_r^*

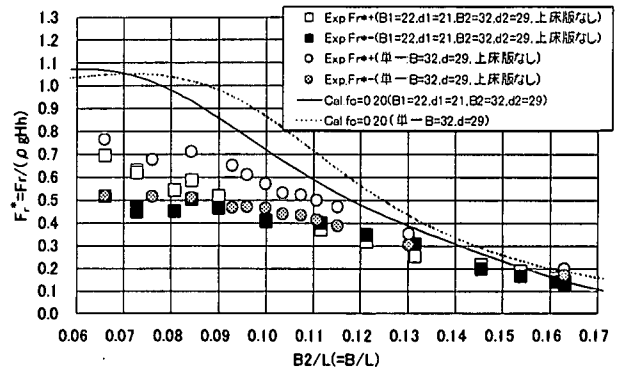


図-14 直立壁に作用する水平波力 F_r^*

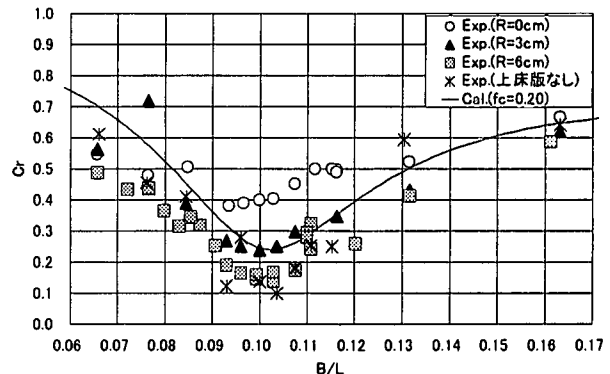


図-15 単一垂下板式反射波低減工の反射率 C_r

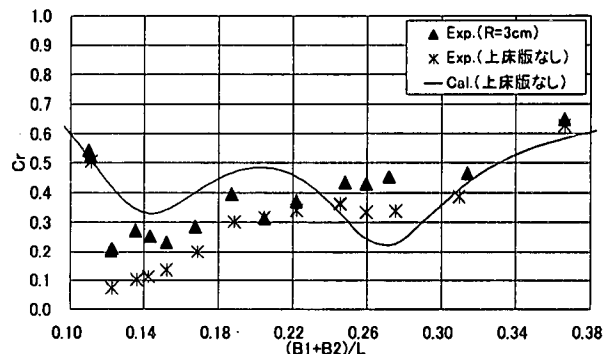


図-16 二重式垂下板構造の反射率 C_r

参考文献

- 1) 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝：渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について、海岸工学論文集，第46巻，pp. 797-800，1999。
- 2) 中村孝幸・井手義彦：波の逸散現象を利用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，pp. 177-182，1997