

水面下に透過部を有する鉛直堤の波浪制御に関する基礎的研究

Experimental Study on Wave Control by Vertical Permeable Breakwater of Horizontal Slit Type

落合 実・遠藤茂勝*

Minoru Ochiaii and Shigekatsu Endo

In this paper, characteristics of the wave control for vertical permeable breakwater with a horizontal slit at under still water level were investigated experimentally. In the experiments, the motion of sea surface wave facing a vertical breakwater, reflected wave and transmitted wave were measured.

Relation between water surface displacement and the slit heights were discussed. And these relationships were compared with submerged breakwater of vertical wall type. It was clearly that the slit height having a good effect on wave control of permeable breakwater was determined.

keywords : wave control, permeable breakwater, submerged breakwater

1. はじめに

利用海域の拡大や多様化に伴い、外海からの波浪を効率よく消波し、その上環境保全のためにも閉鎖水域を少なくする観点から適度な透過性を持たせる工夫が必要となる。これらの目的に合致した形式の海洋構造物、すなわち波浪制御構造物が望まれる。また従来から消波や透過を目的とした波浪制御構造物としては透過型防波堤が検討されているが、大水深におけるそれらの機能については十分な検討がなされていない。

透過堤は直立堤や混成堤の直立部あるいは異形ブロックを用いた斜面堤などが主で、それらは波浪の入射面全体が透過形式となっている¹⁾。一方、波浪エネルギーは静水面近傍に集中し、特に波の透過や反射におよぼす影響は静水面下の構造が大きく支配することが認められている²⁾。

そこで本研究では、構造物自身が波浪エネルギーを減殺し、適度な透過波浪および反射波の軽減が図れる波浪制御構造物の開発を目的としている。本論はその基礎的な段階として直立型防波堤の水面下の一部を透過とした構造物を対象に水理実験を行い、水面下の透過部が堤体の前面水位変動や反射波および透過波におよぼす影響について実験的に検討する。

2. 実験模型と実験方法

(1) 実験模型

混成堤の直立部の前面を一様な透過型とする形式が一般的であるが、本研究では波の反射や透過に対して静水面以下の構造が大きく寄与していることを考え、実験堤体の構造は静水面以下のみに1つの横スリットの透過部を設け、静水面以上の部分は不透過壁としたものである。図-1にその概略を示す。実験堤体は厚さ0.6cm鋼鉄製で、横スリットの透過幅： H_c を0~15cmの範囲で任意に設定できる構造となっている。本実験では静水面下のスリット高が入射波浪にどのような影響を与えるかを検討することを主眼としているので単

純な構造としている。それは実機では本堤体と類似の直立透過堤を複数枚並べる形式が想定されるので、このような基礎実験から得られる水理量はその基本特性として位置付けられる。

(2) 実験装置および方法

実験は図-2に示すような2次元の規則波造波水槽を用い、水槽のほぼ中央部に堤体を設置した。波浪条件は入射波波形勾配： $H_i/L=0.013\sim0.076$ 、相対水深： $h/L=0.097\sim0.207$ 、水深： $h=40\text{cm}$ としている。水位変動

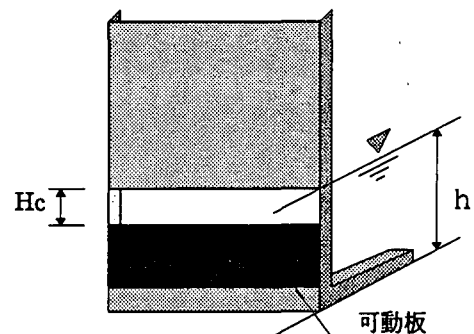


図-1 実験模型概略図

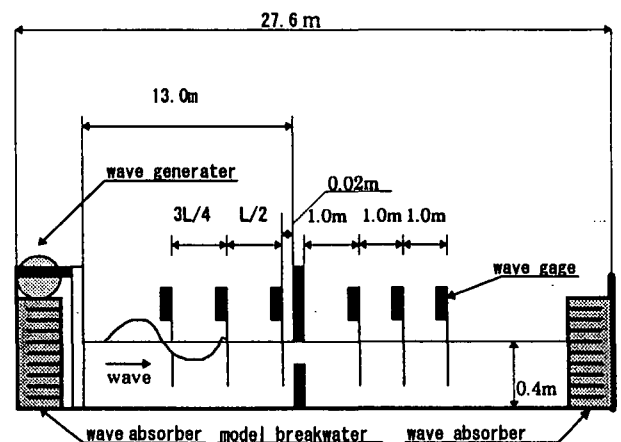


図-2 実験装置概略図

については反射波、前面水位そして透過波の減衰効果などを検討するために合計6カ所に設置した容量式水位計で計測する。水位計からの出力はデジタルレコーダで収録し、パソコンにより静水面を基準とした波の峯を「波頂高」、谷を「波底高」とし分けて算出する。反射率はHealy法により算定する。また、本堤体の波浪制御効果を検討するために静水面上の直立壁を取り除いた「直立不透過潜堤」の実験結果と比較検討する。本文ではこの潜堤を「直立潜堤」、本透過堤を「透過堤」と称することとする。

3. 実験結果および考察

3. 1 堤体背後領域の水位変動特性

図-3(a)および(b)は透過堤背後領域の水位変動を時系列で示した一例で $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ におけるそれぞれ $H_c/h=0.1$ および $H_c/h=0.3$ の結果である。また、それらの図は堤体背後1, 2, 3m地点($1/L=0.42, 0.84, 1.25$)で得られた時系列であり、背後距離による水位変動の変化傾向も示している。時系列においてほぼ一定な振幅が生じる定常波状態を検討の対象波とし、その振幅の平均値を透過波高: H_t としている。

比較的スリット高が小さい $H_c/h=0.1$ において、背後 $1/L=0.42$ 地点の時系列は透過波の峯部、谷部とも波形が乱れ、基本周期波に高周波の波が重なった波形となっている。この高周波の波形は背後 $1/L=0.84$ および 1.25 地点でかなり減少し、背後距離による波形の変化が認められる。また高周波を除いた基本周期の水位変動、すなわち透過波の波形では峯部より谷部の方がかなり小さくなっているが、透過波高は各地点でほぼ同程度であり、背後距離に伴う波高の減衰傾向は認められない。一方、図-3(b)は比較的スリット高の大きい $H_c/h=0.3$ の結果で、 $H_c/h=0.1$ で認められた高周波の水位変動が認められず、ほぼ基本周期の波形となっている。これはスリット高が大きい場合には入射波のエネルギーが直接通過し、背後域の水面を振動させることとなり、波浪に対してあまり影響を及ぼさないスリット高、すなわち波浪制御効果が期待できない堤体となる。

図-4(a)は透過堤における入射波形勾配と透過率: $K_t=H_t/H_i$ の関係をスリット高と堤体背後距離をパラメータとして表している。波形勾配が約0.02以下で若干ばらつきが生じているが約 $H_i/L>0.02$ で波形勾配の増加とともに透過率が平均的に若干減少することが認められる。また堤体背後距離に伴う透過率の顕著な減衰傾向は認められない。これらの波形勾配と透過率の関係や背後距離と透過率の関係はスリット高が小さい場合もほぼ同様に認められ、スリット高の変化は平均的に透過率を変化させることがわかる。

図-4(b)は直立潜堤における入射波形勾配と透過率の関係を示すもので図-4(a)に示す透過堤の結果と直接比較できる。直立潜堤では透過堤で認められた入射波形勾配の増加に伴う透過率の減少は認められず、ほぼ一定となっている。また背後距離の変化に伴う透過率の明瞭な減衰は透過堤と同様に認められない。また平均的な透過率としては $H_c/h=0.1$ において直立潜堤の約70%程度が透過堤の透過率となり、透過堤の消波機能の有効性が認められる。

図-5(a)は透過堤における相対水深: h/L と透過率の関係について相対スリット高: H_c/H_i をパラメータとして示したもので、透過率の堤体背後距離によるばらつきを考慮して、透過率を堤体背後3地点の波高の平均値で表している。そして図-5(b)は直立潜堤における

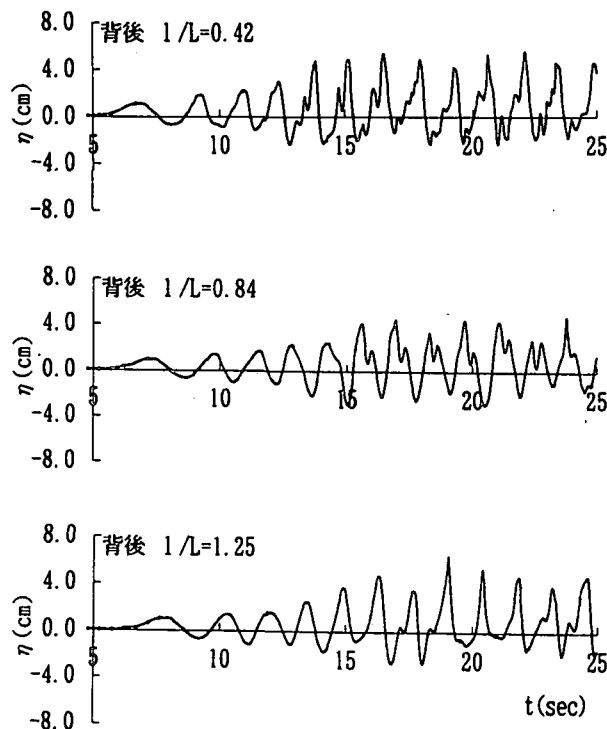


図-3(a) 透過波の時系列($H_i/L=0.051$, $H_c/h=0.1$)

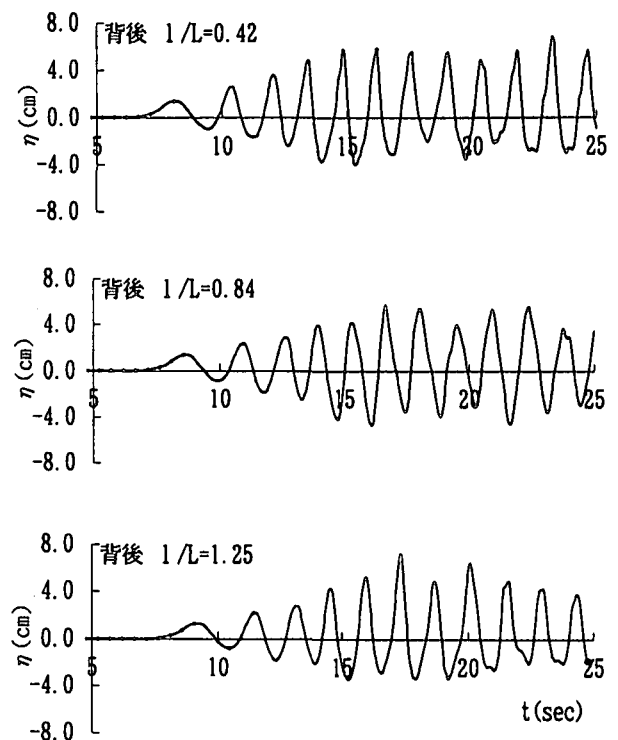


図-3(b) 透過波の時系列($H_i/L=0.051$, $H_c/h=0.3$)

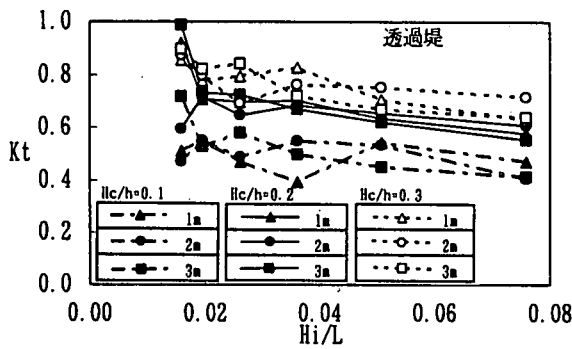


図-4(a)入射波形勾配と透過率の関係(透過堤)

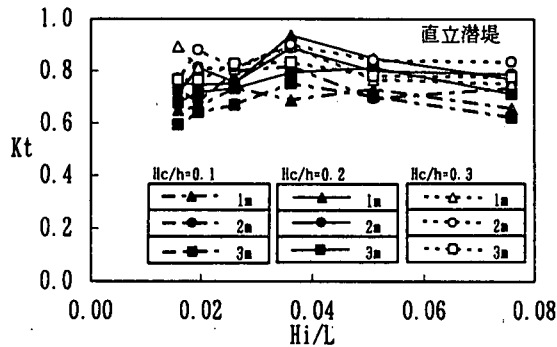


図-4(b)入射波形勾配と透過率の関係(直立潜堤)

同様の関係を示すものである。これらの図から透過堤では各スリット高の堤体において相対水深の増加に伴う透過率の減少傾向が認められるが、直立潜堤では特に $H_c/h=0.20$ の堤体において $h/L=0.14$ 付近で若干透過率が大きくなるもののほぼ一定傾向となっていることが認められる。透過堤の透過率は $H_c/h=0.20$ および 0.3 のスリット高の堤体で $h/L < 0.1$ において直立潜堤より若干大きくなっているが、 $h/L > 0.1$ の範囲で直立潜堤よりかなり小さい透過率となり、本透過堤では相対水深および入射波形勾配の大きい波に対する消波効果が期待できることを示している。

図-6は透過堤および直立潜堤における堤体スリット高 H_c/H_i と透過率の関係を示す。図中の透過率は堤体背後3地点の波高の平均値であり、 $H_i/L=0.051$ 、 $h/L=0.17$ および $H_i/L=0.026$ 、 $h/L=0.12$ の結果を示している。透過堤においてスリット高が狭くなるに伴い透過率は減少し、特に $H_c/H_i \leq 0.6$ の範囲で透過率が著しく小さくなる傾向が認められる。直立潜堤と比較すると、 $H_i/L=0.051$ 、 $h/L=0.17$ において $H_c/H_i > 1.0$ の範囲では透過堤の透過率は直立潜堤より約10%程度小さく、そして $H_c/H_i \leq 0.6$ の範囲になると透過堤の透過率は直立潜堤と比べて著しく小さくなり、静水面上の壁による消波機能の有効性が認められる。また $H_i/L=0.026$ 、 $h/L=0.12$ においては約 $H_c/H_i > 1.1$ で透過堤と直立潜堤の透過率がほぼ等しくなることから、この範囲のスリット高では透過堤の水面上の壁による消波機能が効果的でないことが認められる。

このように透過堤の透過率が直立潜堤に比べ平均的にかなり小さく、消波機能の有効性が認められるスリ

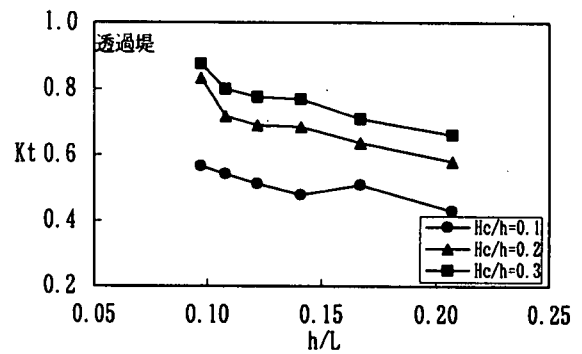


図-5(a)相対水深と透過率の関係(透過堤)

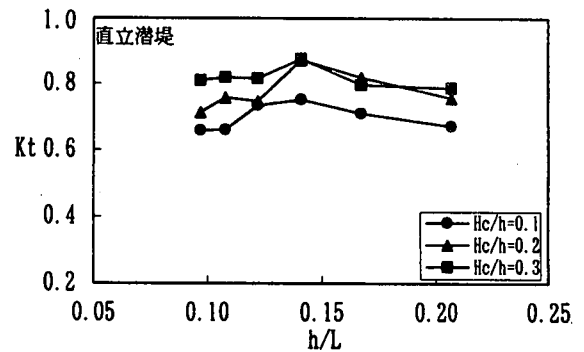


図-5(b)相対水深と透過率の関係(直立潜堤)

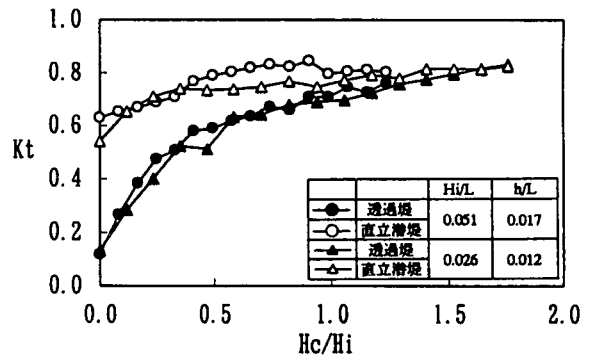


図-6 スリット高と透過率の関係

ット高が得られたが、このスリット高の透過堤では静水面上および水面下の壁に入射波が衝突し、壁前面で上下方向の水位変動となり、堤体を通するエネルギーが減衰するためと考えられる。そしてスリット高と透過率との関係からは約 $H_c/H_i \leq 0.6$ の範囲の透過堤が有効であるものと考えられる。

3.2 堤体前面領域の水位変動特性

図-7(a)は透過堤および直立潜堤における入射波形勾配と堤体前面水位変動量 η/H_i の関係を示す。図は相対スリット高 $H_c/h=0.1$ の結果であり、堤体前面水位変動量は定常波における水面変動をゼロアップクロス法で波高値とし、その波高値を静水面を基準とした波頂高 η_o と波底高 η_u に分けて示している。図中の透過堤において $H_i/L \geq 0.03$ の範囲で波形勾配が大きくなると波頂高、波底高ともに若干大きくなる傾向が認められる。また透過堤の波底高は平均的に波頂高の約4割程度となっている。そして直立潜堤と比較すると、透過堤で認められた波形勾配の増加に伴う透過率の変

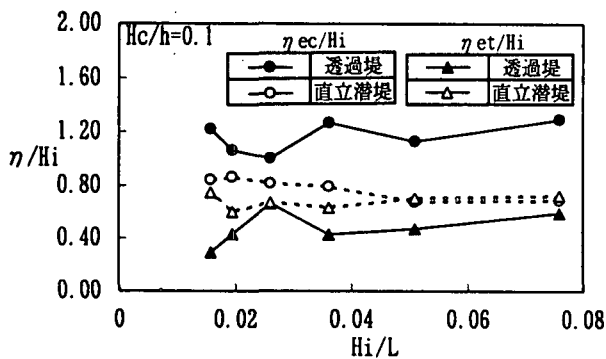


図-7(a) 波形勾配と前面水位の関係($H_c/H_i=0.1$)

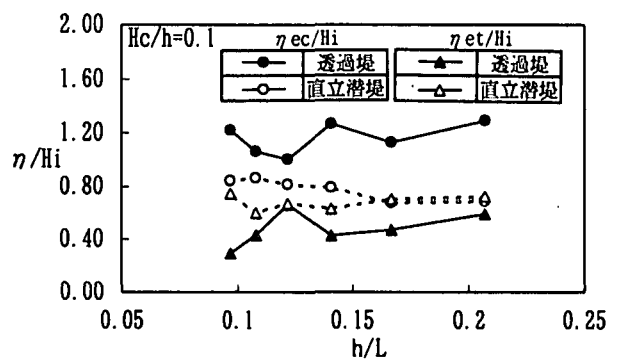


図-8(a) 相対水深と前面水位の関係($H_c/H_i=0.1$)

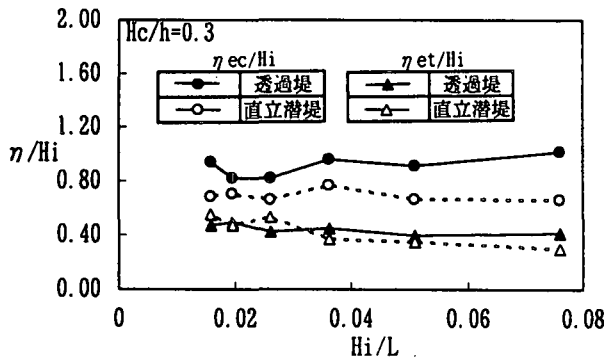


図-7(b) 波形勾配と前面水位の関係($H_c/H_i=0.3$)

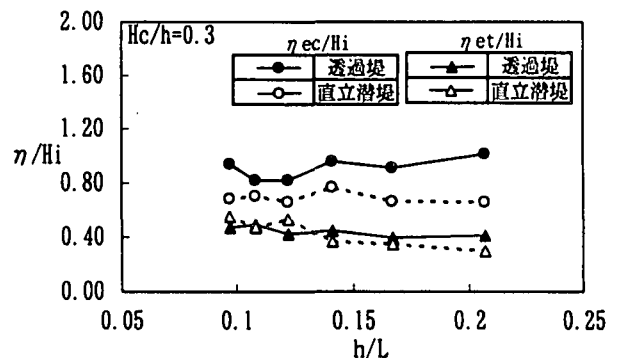


図-8(b) 相対水深と前面水位の関係($H_c/H_i=0.3$)

化傾向は直立潜堤では認められず、逆に若干小さくなる傾向を示している。また波頂高に対する波底高の割合は透過堤において約30～50%程度であるが、直立潜堤では波頂高と波底高がほぼ同じ値となっている。そして透過堤の波頂高は直立潜堤に比べ、平均的に約1.5～2倍程度大きくなり、波底高では平均的に約20～40%程度透過堤の方が小さくなっている。

図-7(b)はスリット高が比較的大きい $H_c/h=0.3$ に対する同様の関係を示している。波形勾配の増加に伴う波頂高の変化傾向はスリット高が比較的小さい場合と同様となっているが、透過堤の波底高は波形勾配の増加に伴う変化が少なくほぼ一定となっている。また透過堤と直立潜堤の波底高は、約 $H_i/L>0.04$ の範囲でほぼ同程度となっている。そして透過堤と直立潜堤の波頂高は波形勾配が大きくなるほどそれらの差が大きくなることも認められる。

図-8は透過堤および直立潜堤における相対水深と堤体前面水位変動量の関係を示す。図-8(a)および(b)はそれぞれ $H_c/h=0.1$ および 0.3 の結果を示したものである。図中の透過堤において $h/L\geq 0.15$ の範囲になると相対水深の増加に伴い波頂高が若干大きくなる傾向が認められる。そして相対水深の増加に対する波頂高や波底高の変化傾向、また透過堤および直立潜堤における波頂高と波底高の比率などは図-7で示された結果と同様となっている。

図-9(a)は透過堤および直立潜堤におけるスリット高と堤体前面水位変動量の関係を示す。そして図-9(a)および(b)はそれぞれ $H_i/L=0.051$ 、 $h/L=0.17$ および $H_i/L=0.026$ 、 $h/L=0.12$ の結果を示している。図-9(a)

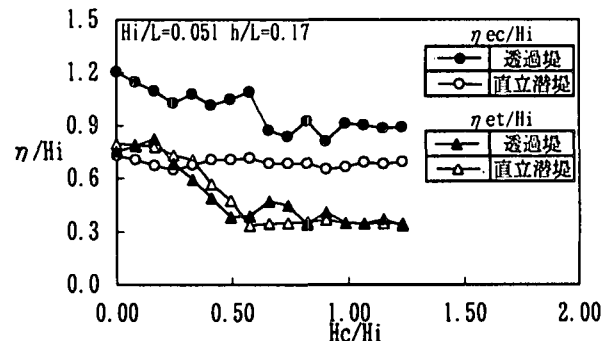


図-9(a) スリット高と前面水位の関係($H_i/L=0.051$)

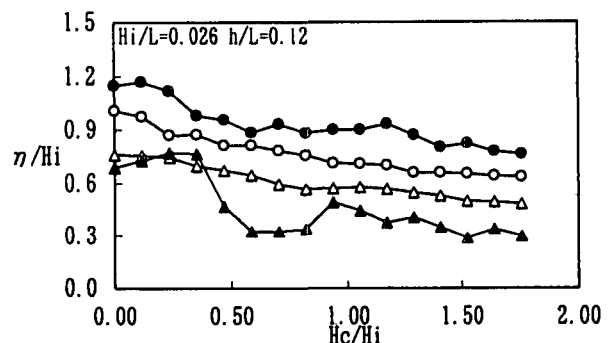


図-9(b) スリット高と前面水位の関係($H_i/L=0.012$)

より透過堤においてスリット高が狭くなるに伴い波頂高は若干大きくなり、そして波底高は $0.2\leq H_c/H_i\leq 0.6$ の範囲で急激に増大することが認められる。これは堤体スリット高が狭くなると堤体面で反射が増大し水面波形が壁面付近で尖るためと考えられる。また直立潜堤と比較すると、透過堤におけるスリット高の変化に伴う波頂高および波底高の増加傾向は直立潜堤とほぼ

同様であるが、透過堤の波頂高の増加傾向の方が若干直立潜堤より大きくことが認められる。そして透過堤の波頂高は直立潜堤より平均的に約1.7倍程度大きくなるが、波底高においては透過堤の方が約 $0.2 < H_c/H_i < 0.6$ の範囲で直立潜堤より若干小さく、 $H_c/H_i > 0.6$ の範囲では透過堤と直立潜堤の波底高はほぼ同程度の値となっている。一方、図-9(b)においてはスリット高の変化に対する前面水位の波頂高の増加傾向は図-9(a)と同様であるが、波底高に関しては透過堤の場合、約 $l/c/l_i > 0.6$ の範囲ではほぼ一定値となることが認められる。そして約 $l/c/l_i > 0.6$ の範囲では透過堤の波底高が直立潜堤より約40~50%程度小さくなっている。このことはスリット部における波の戻り流れが直立潜堤よりも透過堤の方が大きいことによるものと考えられる。

3. 3 堤体前面からの反射波特性

図-10は透過堤および直立潜堤における入射波形勾配と反射率 $K_r = K_t/H_i$ の関係を示す。図は $H_c/h=0.1$ および 0.3 の堤体における反射率をHealy法により算定した結果である。図中の比較的小さい透過堤および直立潜堤においては波形勾配の増加に伴う反射率が若干大きくなる傾向が認められる。またスリット高が大きい場合には透過堤および直立潜堤とも波形勾配の増加に伴う反射率の変化は約 $0.03 < H_i/L < 0.05$ で若干大きくなるものの顕著な傾向は認められない。

図-11は透過堤および直立潜堤における相対水深と反射率の関係を示す。図は $H_c/h=0.1$ および 0.3 の結果を示したものである。図において比較的小さい透過堤および直立潜堤においては相対水深の増加に伴う反射率が若干大きくなる傾向が認められる。またスリット高が大きい場合には相対水深の増加に伴う

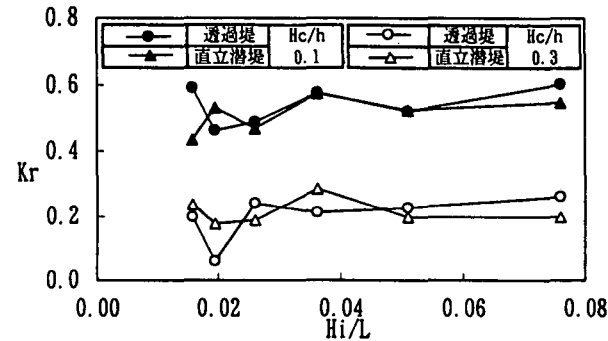


図-10 入射波形勾配と反射率の関係

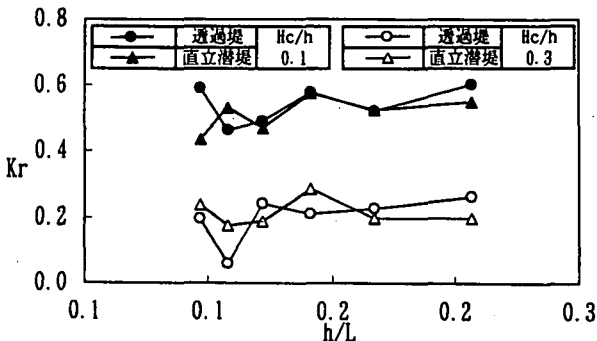


図-11 相対水深と反射率の関係

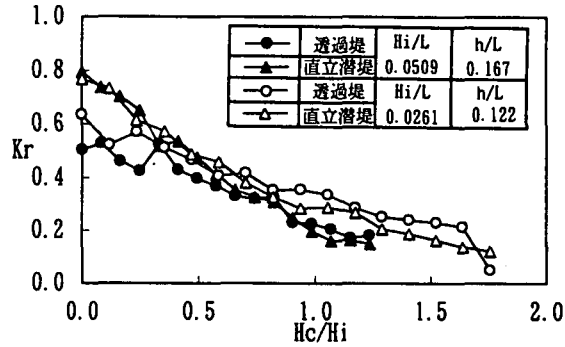


図-12 スリット高と反射率の関係

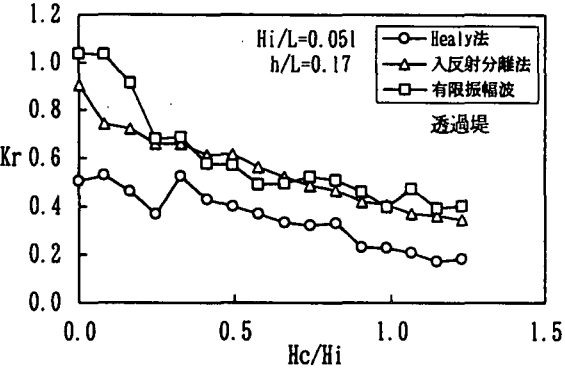


図-13 反射率算定法の比較

反射率の変化は直立潜堤において 約 $h/L=0.14$ 程度で若干大きくなるものの透過堤および直立潜堤とも顕著な傾向は認められない。このように透過堤の反射率は波形勾配や相対水深による影響が少なく、直接的にはスリット高によって平均的な反射率が決定されることが認められる。

図-12は透過堤および直立潜堤における堤体スリット高と反射率の関係を示している。図には $H_i/L=0.051$ 、 $h/L=0.17$ および $H_i/L=0.026$ $h/L=0.12$ の結果を示す。図において透過堤および直立潜堤の反射率はスリット高が狭くなるに伴い大きくなる傾向を示している。その増加割合は約 $H_c/H_i > 0.6$ の範囲において 透過堤および直立潜堤ともほとんど同じであるが 約 $H_c/H_i < 0.6$ の範囲になるとかなりの差が生じている。透過堤において 約 $H_c/H_i < 0.6$ の範囲での反射率が直立潜堤よりも小さく、また本来完全重複波となる $H_c/H_i=0$ においてもかなり小さい値を算定している。このことは透過堤のスリット高が小さい場合には反射波と入射波の合成波が Healy法で扱えない波形となっているか、すなわち反射波が大きく合成波の波形が崩れているか、あるいは複雑な反射波が生じる確かな重複波の観測が困難となっているものと考えられる。このようなことから図-10~12では堤体のスリット高の変化に伴う反射率の変化傾向およびそれらの直立潜堤との違いを検討するものとし、スリット高の小さい範囲に対する反射率の評価を次に行う。

反射率の算定において規則波を対象とした場合、Healy法が多く用いられているが 入反射分離法³⁾や有限振幅波理論に基づく重複波の算定から反射率を求める

方法⁴⁾等もある。そこで本堤体で得られた波浪測定結果に対してそれらの算定方法を適用した時の反射率とスリット高の関係の一例を図-13に示す。図は透過堤における $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ の結果であり、各反射率はスリット高が狭くなる程、大きくなることを示している。そしてスリット高の極めて小さい約 $H_c/H_i < 0.3$ の範囲では各反射率に顕著な差が生じるが、約 $H_c/H_i \geq 0.3$ の範囲では入反射分離法と有限振幅重複波理論からの反射率がほぼ同程度となることが認められる。またHealy法による反射率は他の2種類の方法による結果より小さい値となり、 $H_c/H_i < 0.3$ の範囲では約20~50%, $H_c/H_i > 0.3$ の範囲では平均的に約10~15%程度小さい値を示している。このような結果は他の波浪に対しても認められ、反射率を過小評価するというHealy法の特長と考えられる。

3. 4 水位変動の相関

図-14(a)は透過堤における反射波、透過波そして堤体前面水位の相関関係を示したものである。図は $H_i/L=0.051$, $h/L=0.17$ におけるスリット比 $H_c/\eta_{\max}$ に対する透過率 K_t 、前面水位波頂高 $\eta_{ec}/\eta_{\max}$ 、波底高 $\eta_{et}/\eta_{\max}$ そして反射率 K_r の関係である。ここで $\eta_{\max}$ は完全重複時の波頂高であり、 K_r はHealy法による結果である。スリット高が狭くなるに伴い前面水位変動と反射率は大きくなり、逆に透過率が小さくなる傾向を示しているがその変化割合はそれらの水位変動諸量において約 $H_c/\eta_{\max} < 0.3$ の範囲でそれぞれ著しくなることが認められる。そして約 $H_c/\eta_{\max} \approx 0.3$ 程度においては $K_r \approx K_t \approx 0.5$ となり、 $K_r + K_t \approx 1$ の関係が確認される。この関係は約 $H_c/\eta_{\max} > 0.3$ においても成り立ち、スリット高が大きくなるに伴い、反射率よりも透過率の割合が大きくなる傾向となる。しかし約 $H_c/\eta_{\max} < 0.3$ の範囲では $K_r + K_t \approx 1$ の関係が認められない。このことから約 $H_c/\eta_{\max} < 0.3$ においては反射率がその算定法の違いにより小さく推算されているものと考えられる。図-14(b)は $H_i/L=0.026$, $h/L=0.12$ の結果を示しているが、図-17(a)の傾向とほぼ同様であり、これらの傾向は他の波においても認められる。

4. 結言

以上のように水面下のみに横スリットの透過部を設けた透過堤を対象にスリット高の変化に対する透過率や堤体前面水位変動および反射率の結果が得られ、直立潜堤の結果との比較から次の事柄が明らかとなった。

- 1) 堤体背後領域の透過波の水位変動は基本周期以外に高周波の波が発生するが背後距離が長くなるに伴い減衰し、基本周期の波となる。しかし背後距離による透過波高の顕著な減衰が本条件においては認められない。
- 2) 透過率は波形勾配や相対水深により若干変化するがスリット高が支配的であり、特に約 $H_c/H_i < 0.6$ の範囲で著しく小さくなる。またスリット高が入射波高より大きくなると波高低減効果が得られず、直立潜堤とほぼ同程度となり、静水面上の壁の効果は少なくなる。
- 3) 堤体前面の重複波水位は波形勾配や相対水深にあま

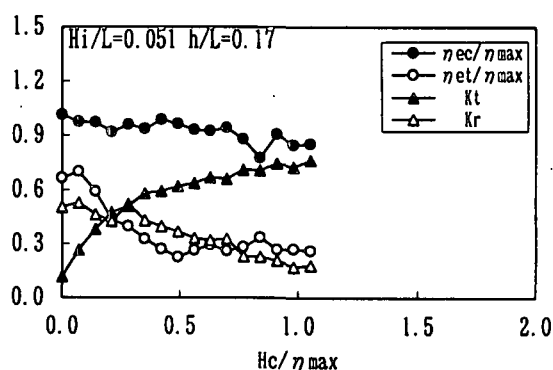


図-14(a) 水位変動の相関関係($H_i/L=0.051$)

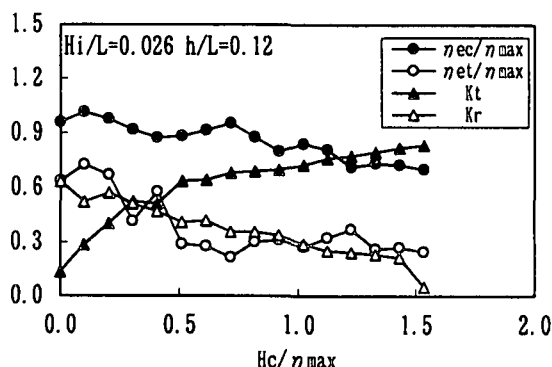


図-14(b) 水位変動の相関関係($H_i/L=0.012$)

り影響されないがスリット高が支配的であり、 $H_c/H_i < 0.6 \sim 0.7$ の範囲で波頂高よりも波底高が顕著に大きくなる。また $H_c/H_i > 0.6 \sim 0.7$ の範囲で波頂高と波底高の割合はほぼ3:1であり、直立潜堤より波頂高が大きく、波底高が小さい変動となる。

4) 反射率は波形勾配や相対水深による影響よりスリット高が支配的であり、約 $H_c/H_i < 0.3$ の範囲で著しく大きくなる。また約 $H_c/H_i > 0.3$ の範囲での透過堤の反射率は直立潜堤のそれとほぼ同じ値となっている。

5) 反射率の算定方法の違いを検討したが透過率との相関から本堤体では反射波が大きくなる約 $H_c/H_i < 0.3$ の範囲で入反射分離法あるいは有限振幅重複波理論が、比較的反射波が小さい約 $H_c/H_i > 0.3$ ではHealy法が有効と考えられる。

6) 本透過堤は直立潜堤と比較して前面水位変動がやや大きいものの透過波高と反射率の関係において優位性が認められ、効果的な消波機能を有するスリット高は $0.3 \leq H_c/H_i \leq 0.6$ の範囲であることが明らかとなった。

今後この透過堤の波浪制御効果については、透過部形状や透過部付近の流水現象と併せて、より詳細に検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 例えば、宇多他;海講論文集, pp441~445, 1987. 荻原他;海講論文集, pp532~536, 1988. 小島他;海洋開発論文集, pp247~252, 1993. 辻他;年次講演概要Ⅱ部, pp854~855, 1993など。
- 2) 例えば、遠藤他;海洋開発論文集, pp19~24, 1991. 落合他;海洋開発論文集, pp165~170, 1993など。
- 3) 合田他;港湾技研資料, No248, pp3~24, 1976.
- 4) 合田他;港湾技研報告, Vol17, No3, pp3~58, 1968.