

屈折効果を利用した縦型傾斜式離岸堤の水利特性

合 田 良 実*・山 田 晶 子**

1. はじめに

海岸を防護する離岸堤はわが国では20年ほど前から次第に普及し、近年は諸外国でもその効用に関心が集まっている。しかし、最近では水面上に天端が突出した形が景観上好ましくないとして、幅広い潜堤形式の人工リーフなどが各地で建設されている。経済力の向上によってコストよりも美観を大切にするようになったといえる。

人工リーフは、主としてある限界以上の波高の波を選択的に碎波させるもので、天端上の底面摩擦が二次的減衰作用をもたらす。このため潮差の大きな海域では、高潮時に波浪減殺機能が低下する。また、小型船の航行上の支障や、岸側の水位上昇による開口部の洗掘その他の問題がある。

自然の岩礁地帯を観察すると、波は屈折しながら岩礁上に寄り集まり、そこで効率よく碎波させられている。そこで、図-1 のように複数の傾斜式離岸堤を波峰に直角に配置すると、波は斜面によって屈折して天端上に集まり、波高の低い波でも効率的に碎波減衰させることができると考えられる。こうした新形式の離岸堤の波高伝達率を水理実験および数値実験で確認するのが本研究の目的である。

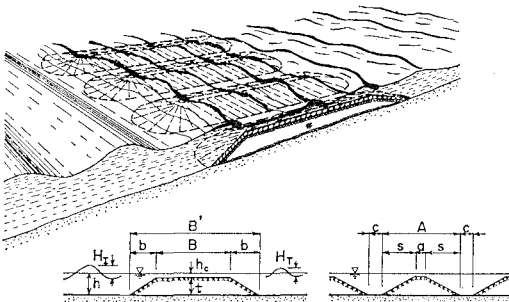


図-1 縦型傾斜式離岸堤の概略図

2. 縦型傾斜式離岸堤の提案

宇多ら(1988)は天端高および天端幅を周期的に変化

させた人工リーフについての海浜安定効果を調べており、この中で天端幅が広いところで天端高を高く、天端幅が狭いところで天端高を低くしたモデルを示し、リーフ沖への砂の流出防止に有効であるとしている。

また、藤原ら(1990)はレンズマウンド(角錐台)の消波特性について検討を行っており、この結果、天端水深 $h_c/H_0=0.5$ のとき堤体底幅を波長の0.9倍以上とすれば、波高伝達率 K_T を0.6以下にできるとしている。ただし、水深波長比が小さくなると、角錐台の斜面を非常に緩やかにしないと必要な底幅を確保できない難点がある。

このような二、三の新形式の離岸堤形状をさらに発展させ、図-1のような縦型傾斜式離岸堤を新規に提案する。これは、通常的人工リーフが岸に平行に長く伸びているのに対し、天端部分を縦方向の溝状に整形し、それによって生み出された材料を使って天端を縦方向により長く拡大するものである。この形状では、先端の円錐状の部分および側方の斜面によって波が屈折して天端上に集まり、波が効果的に碎けてエネルギーを消耗することが期待される。人工リーフでは低波高の波はあまり減衰しないが、この形状ではかなり低い波でも碎波減衰すると考えられる。

今、通常的人工リーフも含めて、図-1の寸法図のように、天端幅を B 、前・後斜面幅を b 、天端長を a 、横斜面幅を s 、基底間距離を c 、離岸堤高を t と定義する。この離岸堤1基の体積 V は、前・後斜面と横斜面の取り付け部分を楕円錐体とみなすことによって次のように求められる。

$$V = t[b(a + \pi s/3) + (a + s)B] \dots\dots\dots (1)$$

通常的人工リーフとして $B=40\text{ m}$ 、 $a=150\text{ m}$ 、 $t=5\text{ m}$ 、 $b=s=10\text{ m}$ の規模を想定すると、1基の体積は、 $V=40,024\text{ m}^3$ となる。この人工リーフの沿岸方向の投影幅は $A=170\text{ m}$ であるので、これを $a=9\text{ m}$ 、 $b=10\text{ m}$ 、 $s=12.5\text{ m}$ 、 $c=0\text{ m}$ の縦型傾斜式離岸堤基で置き換えるとすると、天端幅は $B=64\text{ m}$ に広げることができる。

また、 $a=4\text{ m}$ 、 $c=5\text{ m}$ とすると、 $B=87\text{ m}$ とすることが可能である。この例のように、縦型傾斜式離岸堤は天端幅を2倍前後にまで拡張できる。

* 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科

** 横浜国立大学大学院 工学研究科

なお、以下においてはその形が縦に細長いところから B を天端長、 a を天端幅と呼び替えて使用する。

縦型傾斜離岸堤のもう一つの特長は、水産協調型施設として優れていることである。天端面や横斜面は築磯として稚魚の成育に役立つと同時に、貝類や海藻などの育成に利用可能であり、漁船は離岸堤の間の滞(みお)筋を利用して栽培生産物を収穫することができる。船が自由に出入できるところが人工リーフと異なる点である。

3. 水利模型実験による検討

3.1 実験方法

実験は長さ 17 m、幅 60 cm の二次元造波水槽に、沖側を 1/20 と 1/10 の勾配斜面ですり付けた長さ 4 m の一様水深部を設置して行った(図-2)。現地水深 5 m 程度、模型縮尺 1/50 程度を想定して、実験諸元を次のように設定した。

離岸堤：全高 $t=10$ cm、天端長 $B=50, 100, 200$ cm

横斜面勾配 1/2.5 および 1/5

前後面勾配 1/2

水深： $h=8.0, 10.0, 12.0$ cm

天端高： $h_c=-2.0, 0.0, 2.0$ cm

波周期： $T=0.7, 1.0, 1.4$ s

波高： $H_T=4.0$ cm

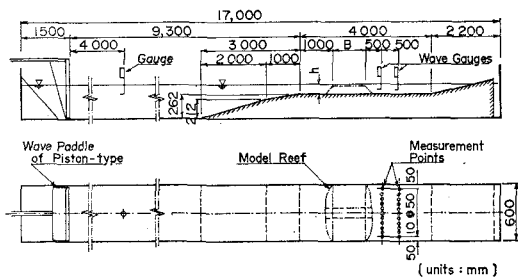


図-2 2次元実験水槽の概略図

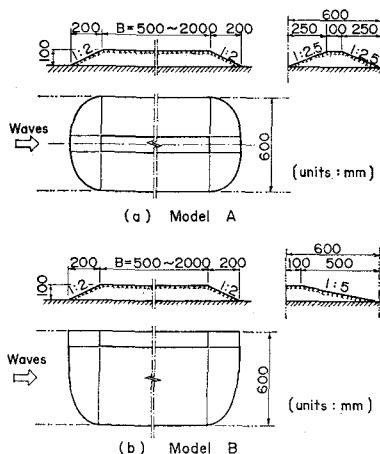


図-3 離岸堤模型の概略図

入射波としては非碎波のできるだけ大波高の波を対象とし、離岸堤の設置前の各水深、各周期における碎波波高の測定結果から、 $H_T=4.0$ cm と定めた。また、離岸堤天端先端の予定位置である一様水深部先端から 1 m の地点において $H_T=4.0$ cm となるように造波機からの出力波高を調節した。

模型離岸堤はふるい目 20~30 mm 通過の碎石を使い、斜面勾配 1/2.5 の場合は天端幅 a を 10 cm として 1 基分を水路幅一杯に作り、斜面勾配 1/5 の場合には現象の対称性を利用して中心軸線からの片側のみを再現した(図-3)。

天端の岸側端から 50 cm、100 cm の所に 2 測線を設けて、5 cm おきに 11 点ずつ、計 22 測点において波高を測定した。ただし、重複波による波高の周期的な増減の影響を相殺する目的で、1 測点について 2 台の波高計を岸沖方向に 1/4L 離して設置し、各測定値を二乗平均して 1 測点の波高とした。二乗平均値を用いるのは、波高をエネルギー的にとらえ、平均する目的からである。

3.2 離岸堤背後の波高分布

実験結果のうち、横斜面勾配 1/2.5 で、天端長が 50 cm と 100 cm の場合の波高分布を、波の周期別に図-4、5、

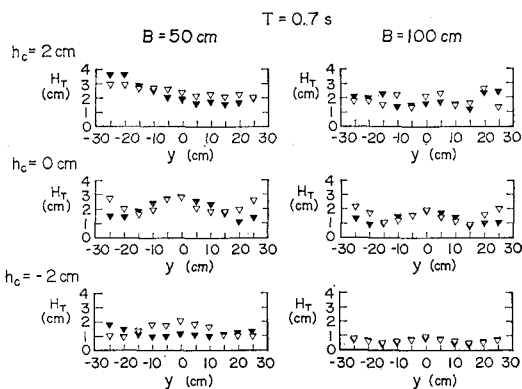


図-4 離岸堤背後の波高分布 ($T=0.7$ s)

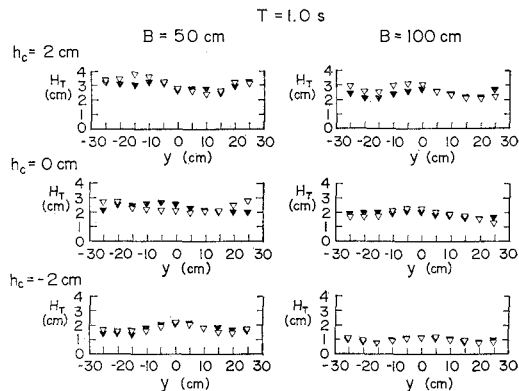
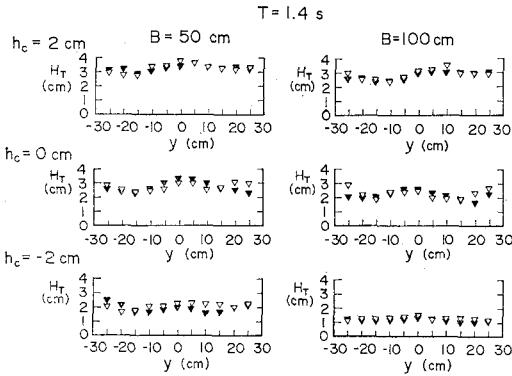


図-5 離岸堤背後の波高分布 ($T=1.0$ s)

図—6 離岸堤背後の波高分布 ($T=1.4$ s)

6 に示す。▽は天端の岸側端から 50 cm, ▼は 100 cm の測線についての波高値である。

全般に中央部と水槽壁付近で波高が高くなっていることが分かるが、横斜面で屈折された波が堤体背後でぶつかりあっていること、水槽の壁で反射された波が重複波を形成していることが考えられ、妥当な結果であるといえる。ただし、水深 12 cm の場合については波周期が短いときほど水面形に乱れが生じているが、水深に対して波長が小さいために碎波や屈折の影響が大きくてたためではないかと考えられる。また周期が短いほど、つまり波長が短いほど波高が小さくなっているが、これは、天端長波長比 B/L の増大によって屈折効果が高まり、碎波しやすくなったためと考えられる。

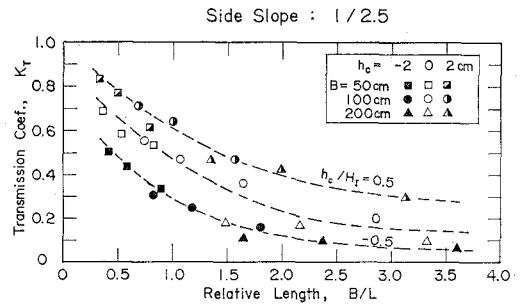
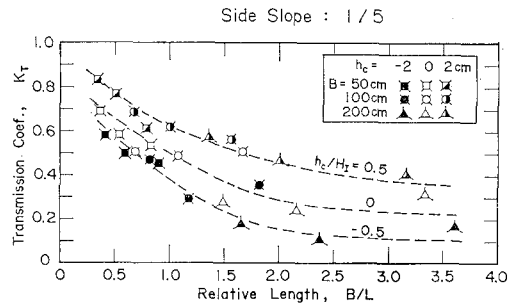
3.3 離岸堤の波高伝達

各測点の波高の二乗平均値と入射波高の比を波高伝達率 K_T とし、 B/L との関係をは h_c/H_I (h_c : 天端高, H_I : 入射波高) をパラメータとして整理したものを図—7, 8 に示す。 h_c/H_I が小さくなると K_T も小さくなるが、天端が水面上に出る形式と潜堤形式とで波浪減衰効果に差が現れたものといえる。

全般に B/L の増大につれて K_T は減少しているが、 $B/L > 2.0$ では減少率が小さくなっている。効率よく波高を減衰させるのは、天端長が波長の 2 倍程度までの場合であるといえる。

なお、横斜面勾配が 1/2.5 の場合よりも 1/5 の場合のほうが K_T がやや大きくなっている。差を生じた理由として、実験を対称軸の半領域で行ったため、例えば左右非対称なカルマン渦列のような現象が再現されず、結果として碎波の発生が抑制される状況にあったのではないかと推測される。また、離岸堤を碎石で作っていることから、1/2.5 の場合には海底にすり付けた端の部分に厚みが残る、屈折効果がやや強く現れたとも考えられる。

波高伝達率の推定用としては、実際の工事では斜面勾配 1/2.5 の方が現実的と思われるので、当面は図—7 を用いるのが適切であろう。

図—7 波高伝達率 ($s=1/2.5$)図—8 波高伝達率 ($s=1/5$)

3.4 離岸堤の反射率

離岸堤の設置による波の反射率を測定した。堤体は碎石で作られるために正確な反射率を求めるのは容易ではないが、離岸堤前面の部分重複波の波形を測定して反射率の近似値を求める Healy の方法を用いた。

部分重複波の波高の最大値 $H_{\max}$, 最小値 $H_{\min}$ から、反射率 K_R は次のように求めることができる。

$$K_R = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad (2)$$

水深 10 cm, 天端長が 50 cm の場合の測定結果を表—1 に示す。反射率 K_R はどの場合も 5% 前後となり、かなり小さいことが分かる。離岸堤の表面が碎石でできているために、大部分の波が離岸堤背後へ通過したためと考えられる。大部分の波が通過しているわりに、波高伝達率 K_T は 55~70% 程度に抑えられているので、この形式の離岸堤は波のエネルギーを効果的に減衰していると言うことができる。

表—1 離岸堤の反射率

周期	0.7s	1.0s	1.4s
勾配 1/2.5	0.049	0.066	0.066
1/5	0.046	0.050	0.064

3.5 離岸堤背後の水位上昇

全実験ケースについて、離岸堤背後の水位上昇量 $\bar{y}$ を求めた。なお、波高を測定したデータから平均水位を求め、静水位との差を水位上昇量としており、水深、天端

表-2 水位上昇量 $\bar{\eta}$ と $\bar{\eta}/H_t$

	天端長 B (cm)			総平均 (cm)	$\frac{\bar{\eta}}{H_t}$
	50	100	200		
$h=8\text{cm}$	0.172	0.098	0.145	0.138	0.035
10cm	0.111	-0.042	0.087	0.052	0.013
12cm	0.117	-0.261	0.085	-0.005	-0.005

長別に平均したものを表-2 に示す。

どのケースでも水位上昇量は1 mm 以下から数 mm 程度で入射波高の 0~4% に止まっており、水位上昇はほとんど生じていないと言うことができる。

4. 数値計算による検討

4.1 波浪場の計算モデル

波の屈折・回折・碎波変形を数値計算する方法としては平口・丸山 (1986) による放物型方程式もあるが、ここでは渡辺・丸山 (1984) による非定常緩勾配方程式に基づく方法を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_x}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_D Q_x = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_D Q_y = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$\hat{Q} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}, \quad Q_r = 0.25 \sqrt{g h^3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

として $\hat{Q} > Q_r$ のとき

$$f_D = 2.5 \tan \beta \sqrt{(g/h)(\hat{Q}/Q_r - 1)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

とする。ここで η は水面変動量、 Q_x 、 Q_y は、 x 、 y 方向の線流量、 C は波速、 $n = C_g/C$ 、 $\tan \beta$ は海底勾配、 h は水深、 g は重力加速度である。 f_D は碎波減衰項であり、合成線流量振幅 Q が再生波領域の線流量振幅 Q_s よりも小さくなる地点ではゼロとする。

数値計算ではこの方程式系を差分化し、対象領域を格子で分割して、各格子点における η 、 Q_x 、 Q_y を逐次計算して求めている。方程式の差分化の手法は、空間的には staggered-mesh 法を、時間に関しては leap-frog 法を用いており、 Δx (沿岸方向)、 Δy (岸沖方向) とともに 5 cm、 $\Delta t = 0.3333$ s とした。

波浪場の算定方法は、この方程式系をまず与えられた入射波・地形条件のもとで碎波減衰項を考慮せずに解き、その結果得られる各計算点における流速と波速の比と与えられた海底勾配の値から渡辺ら (1983) の碎波指標を用いて碎波位置を決定する。その後、碎波帯内では減衰項を付加した非定常緩勾配方程式を解いて最終的な波浪場を求めた。

4.2 実験ケースについての計算結果

模型実験の横断面勾配 1/5.0 の場合について数値計算

を行い、波浪場を求めた。計算条件は、周期を $T=0.7$ 、1.0、1.4 s の 3 種類から $T=0.7 \sim 1.4$ s の範囲で 0.1 s 刻みで 8 種類に増やし、その他の条件は実験諸元に従った。海底勾配は実験では離岸堤の天端上で $\tan \beta = 0$ であったが、碎波減衰項が無くなってしまいうため、実験結果との比較により 1/50 とした。

一例として、水深 12 cm、 $B=100$ cm、 $T=1.0$ s の場合の波高分布を図-9 に示す。天端端から、50 cm、100 cm の測線での波高は、実験と同じく中央部と水槽壁付近で高くなっている。分布がやや非対称であるが、非定常緩勾配方程式モデルにおける側方境界条件の設定方法の問題によるためではないかと考えられる。

なお、図-9 では離岸堤背後の波高の空間変動が著しく、侵食防止施設としての機能に支障があるかのように見えるが、実際には波浪のスペクトル特性による平滑化が期待されるので、大きな問題にはならないと思われる。

波高伝達率は、実験で用いた測点に当たる格子点のみを取り上げると、図-9 に示したような空間的変動のた

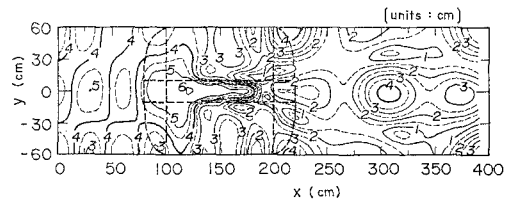


図-9 等波高線図の例

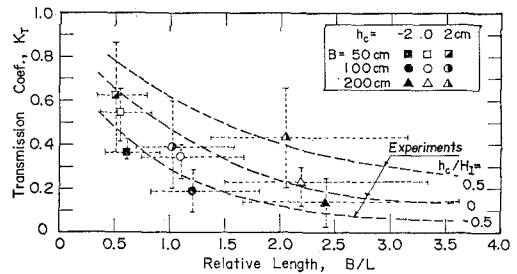


図-10 波高伝達率の数値計算結果

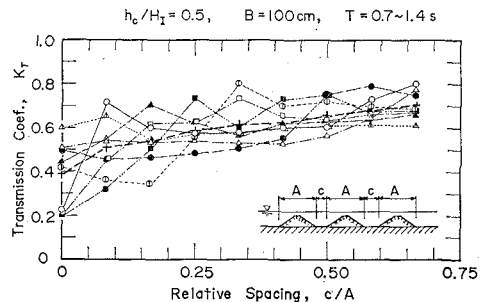


図-11 基底間距離を広げた場合の波高伝達率

めに適切な結果が得られない。そこで、天端端から 50 cm の測線から後ろに 1 m のエリアにある波高データを二乗平均し、入射波高で除して各ケースにおける波高伝達率とした。実験で得られた K_T と B/L との関係に、計算結果をプロットしたものを図-10に示す。ただし、ケースが多いことと、後出の図-11に見られるような周期ごとの変化が大きいので、計算結果は平均値と縦軸、横軸への広がりのみを示している。

波高伝達率 K_T の平均値は、全般に実験結果よりも低めになっているが、全体の傾向は一致している。周期によって K_T が変動する理由としては、計算域地形が離岸堤を側壁で挟む形になっているため、波が側壁との間で干渉を起こし、離岸堤背後への波の通過し易さが周期の影響を強く受けることが考えられる。一方、実験では離岸堤を碎石で作っているため、透水性、粗度、および離岸堤上での碎波などにより、干渉の影響が小さかったのではないかと思われる。その他に、非定常緩勾配方程式を斜面勾配 1/2 の前斜面部を含めて全体に適用していること、また、岩礁上でのエネルギー減衰の特殊性を考慮せずに一様斜面上でのエネルギー減衰項を適用したことなど、計算方法についても問題があったと考えられる。

4.3 基底間距離を広げた場合の計算結果

模型実験では、離岸堤を間を開けずに並列したものについて検討したが、ここでは基底間距離 c を広げたものについて検討を行った。 $c=10\sim 80$ cm の範囲で 10 cm 刻みで 9 種類とし、離岸堤の全幅 A (120 cm 共通)、その他の計算条件は 4.2 と同様である。 K_T と c/A の関係を、周期をパラメータとして図-11に示す。図中の + 印を連ねた太破線は、8 周期に対する平均を示している。 c を a から 10 cm に広げたところで増加の割合が大きくなっているが、それ以降は漸増している。この曲線から、 $K_T \leq 0.6$ となる c/A を求めると、 $c/A=0.3$ となる。このことから、基底間距離を広げても $c/A=0.3$ 程度までは有効な波浪減衰効果を得ることができるといえる。

5. あとがき

今回の実験および数値計算で明らかにすることができたのは以下の通りである。

- 1) 離岸堤背後の波高分布は、屈折・回折効果によって複雑な様相を示すが、エネルギー平均を用いることにより波高伝達率が定義可能である。
- 2) 縦型傾斜式離岸堤の波高伝達率を支配するのは、主として相対天端長 B/L および相対天端高 h_c/H であり、斜面勾配の影響は小さい。
- 3) 数値計算による波高伝達率は実験よりもやや小さめであるが、全体的な傾向は一致する。基底間距離 c を広げると波高伝達率が徐々に増加するが、全幅 A の 30% までは有効な波浪減衰効果を得ることができる。
- 4) 縦型傾斜式離岸堤の反射率は 5% 前後であり、また、背後の水位上昇はほとんど認められない。

ただし、本研究での数値計算には不安定さが残っている。今後は、このような岩礁状の地形に適したエネルギー減衰の導入、および、方程式系の選定をしていく必要があると考えている。

参考文献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 沿岸砂州を模倣した人工リーフの海浜安定効果, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 427-431.
- 平口博丸・丸山康樹 (1986): 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 114-118.
- 藤原隆一・芳田利春・宇多高明・小俣 篤 (1991): レンズマウンドの消波特性と構造物周辺の波高分布・海浜流の予測, 東洋建設技術研究所報告, 第 18 巻, pp. 13-27.
- 本間 仁・堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 217-245.
- 渡辺 晃・原 哲・堀川清司 (1983): 重合した波浪場における碎波について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 5-9.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 103-107.