

人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水理特性の比較について

Comparison of Lateral and Longitudinal Artificial Reef

合田良実*・高木泰士**

Yoshimi, Goda and Hiroshi, Takagi

Abstract

A lateral artificial reef systems is a group of submerged, broad-crested detached breakwaters, which dissipate the incident wave energy by depth-controlled breaking over the crests. A longitudinal artificial reef systems is a grope of wave heights and wave braking process through the refraction effect. Numerical of wave heights and wave-induced currents around these reef systems has been proved in good agreement with laboratory data. Performance of two systems in wave and current attenuation is compared using both laboratory data and numerical predictions.

Keywords: *artificial reef, longitudinal reef, wave transformation, wave-induced currents*

1 はじめに

近年、特に美観に対する配慮から潜堤が離岸堤に取って代わるようになってきた。そして潜堤の中でも、特に人工リーフが注目されており、実際に各地で建設されている。人工リーフは反射や岸側の水位上昇が軽減されること、リーフ上で波高減衰が生じることなどが長所として期待されている。反面、ある波高以上の波を選択的に砕波させるため、低波浪に対しては効果が低減することや、リーフの開口部において強い沖向きの流れが生じることなどの問題点が指摘されている(宇多ほか 1987)。

このような人工リーフの問題点を緩和するため、新しい形式の潜堤「縦型傾斜式離岸堤」が合田・山田(1992)らによって提案されている。

本研究は、縦型傾斜式離岸堤についての既往の研究結果を、平面水槽に人工リーフ模型を設置した実験と数値解析により比較・検討し、縦型傾斜式離岸堤と人工リーフとの水理特性の差異を明らかにすることを目的としたものである。

2 人工リーフに対する数値解析の適用性の検証

2.1 数値解析に用いる理論について

波浪場の計算には平口・丸山(1986)の放物型方程式を用いた。基本式は次式で表される。

$$\nabla \cdot (CC_g) \nabla \phi + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0 \quad (1)$$

ここに、 C は流速、 C_g は群速度、 σ は角周波数、 ϕ は水面変動の複素振幅である。

この基本式を、波の進行方向に逆行する波がないと仮定し、砕波減衰項を付け加え、適当な数式の展開を試みると、以下のような式が導かれる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left\{ i \left(k_x + \frac{k_y}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x CC_g} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (k_x CC_g) \right\} \phi + \frac{i}{2k_x CC_g} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - f_D \phi \quad (2)$$

ここに、 k_x 、 k_y はそれぞれ x 、 y 方向の波数成分であり、 f_D は砕波減衰項を表す任意の関数であり、次のような値をとる。

*フェロー 工博 横浜国立大学 大学院工学研究科 人工環境システム学専攻 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

** 横浜国立大学大学院 工学研究科

$$f_D = \begin{cases} 0 & : a < \gamma h : \text{碎波帯外} \\ \frac{K}{2h} \left[\left(\frac{a}{\gamma h} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} & : a \geq \gamma h : \text{碎波帯内} \end{cases} \quad (3)$$

ここに、Kは減衰係数であり、今回の数値計算においては0.125に設定してある。なお、aは波の振幅、hは水深、 γ は碎波限界振幅と水深の比であり、合田(1973)の碎波指標式で局所的な水底勾配を考慮した値を使用した。

なお、不規則波の数値計算における扱いについては、合田ら(1994, 1996)を参照されたい。

海浜流場の計算については基礎方程式を用いて行い、この際波浪場において求められた radiation stress を起因力とし、これから求まる平均水位の上昇量を連続方程式中に取り込んだ。また、境界条件については海浜流場に導波板を設置し、その位置において流速を0とする固定壁の条件とした。

なお、差分化にあたっては、空間微分に対しては中央差分をとり、沿岸・岸沖方向にそれぞれ10cm間隔の格子を設け、時間微分に対しては前方差分をとり、時間間隔を0.01sに設定した。

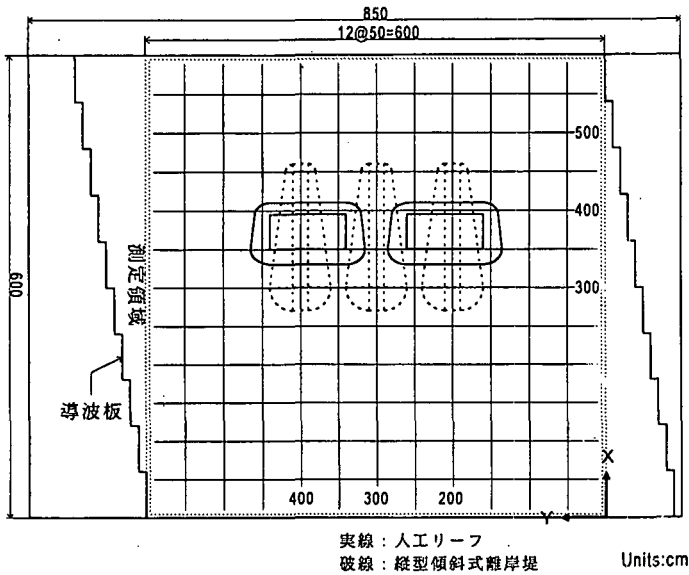


図-1 数値計算のモデル地形

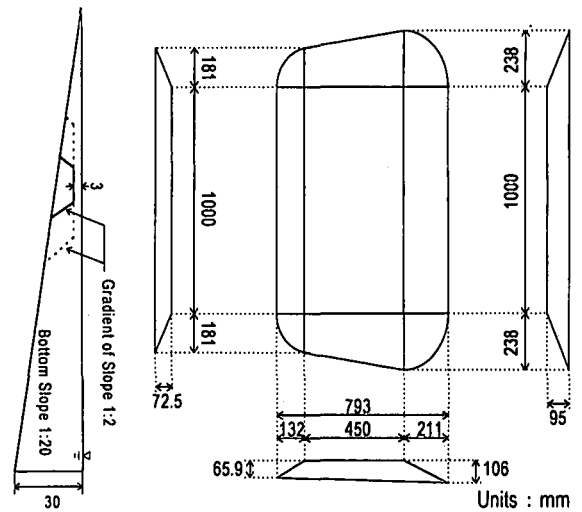


図-2 人工リーフ模型の寸法図

2.2 実験方法

実験は平面水槽を使用して行った。この水槽は造波板前面の勾配0の底面と勾配1/20の傾斜部からなるが、数値計算との比較のため傾斜部先端において入射波高を測定した。人工リーフ模型の作製には、内部に粒径100~150mm、表層部に粒径30~50mmの碎石を用いて整形した。

今回の実験では、入射波として規則波ならびに Bretschneider・光易型スペクトルを持つ一方向不規則波を用い、それぞれの波について入射波高・周期が異なる計4種類の波を入射角15°で造波させた。なお、不規則波の入射波高に関しては有義値をもって代表値とした。

また、測定は波高と流速について行い、波高に関しては容量式波高計、流速に関しては超音波流速計をそれぞれ使用した。

2.3 波高分布に関する実験値と計算値の比較

図-3はいずれも入射波高 $H_{1/3}=5.5\text{cm}$ 、周期 $T_{1/3}=1.6\text{s}$ の波を作用させた場合の岸沖・沿岸方向の波高分布である。左側の図はリーフ上を通過する岸沖方向の断面($Y=400\text{cm}$)に着目した波高分布である。 $X=100\text{cm}$ の地点での実験値が計算値よりも大きな値を示しているのは、実験での入射波高が場所的に最大1cm程度のばらつきが生じていたためであると思われるが、全体的にさほど影響を及ぼしていないと思われるため、これに関しては特に補正を行っていない。また、リーフの背後水域において数値計算での波高が急激に上昇しているのが確認される。これは、リーフ上で碎波した波が背後水域において再生する効果を数値計算中に導入しているためと考えられるが、実験値と比べると過大な値を示しているため、数値プログラムの改良が必要と思われる。次に、沿岸方向の波高分布を示す中央($X=350\text{cm}$)と右側($X=400\text{cm}$)の図についてみると、実

験値・計算値ともに良く一致しており、人工リーフが天端上で大きく波を減衰させているのが確認される。

以上の結果より、今回用いた数値解析プログラムは、人工リーフを設置した場合においても適用可能であり、数値計算によって得られた結果は実際の現象を十分に表すものであると考えられる。

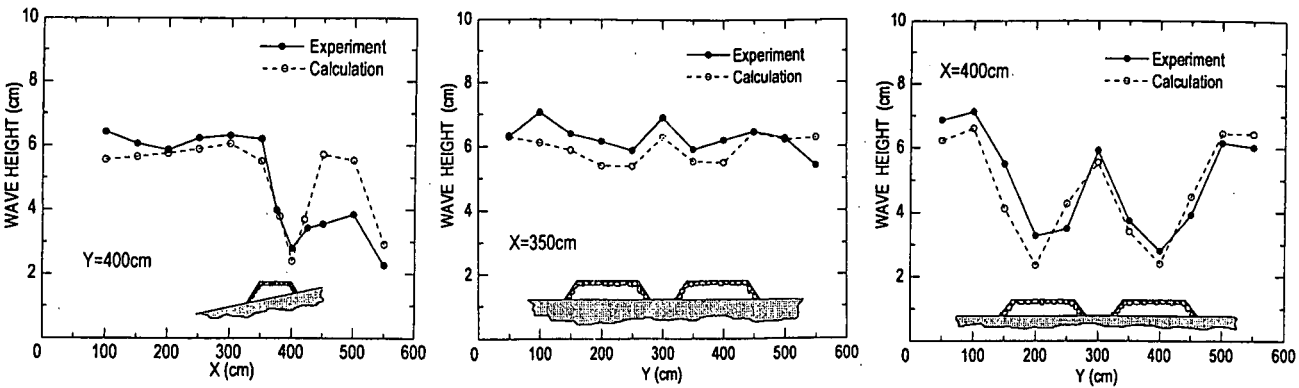


図-3 波高分布の実験値と計算値の比較 (左からY=400cm, X=350cm, およびX=400cmの測定断面)

3 人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水利特性の比較

3.1 リーフ上および背後水域での波高分布の比較

縦型傾斜式離岸堤周辺の波高と海浜流については、先に合田・吉崎・原田(1996)が報告しているので、今回はその実験データを用いて人工リーフとの比較を行った。図-4、図-5は、入射波高 $H_{1/3}=7.5\text{cm}$ 、周期 $T_{1/3}=1.2\text{s}$ の波を作用させたときの沿岸方向の波高分布の実験値と計算値である。実験値・計算値ともにリーフ背後水域($X=450\text{cm}$)においては、縦型傾斜式離岸堤を設置した場合の方が、人工リーフを設置した場合よりも波を大きく減衰させていることがわかる。また、縦型傾斜式離岸堤を設置した場合の実験値では、図中左側のリーフ上の波高が、中央と右側のリーフ上における波高よりも大きな値を示しているのが観察される。これは、縦型傾斜式離岸堤は波の入射角の影響を受けやすく、それによって図中左側の縦型傾斜式離岸堤による波を減衰させる効果が低減したためであると考えられる。これに対して、人工リーフを設置した場合においては、リーフ上で波峰線が揃えられるために、波の入射方向による波浪減衰効果の差異は、ほとんど見られない。

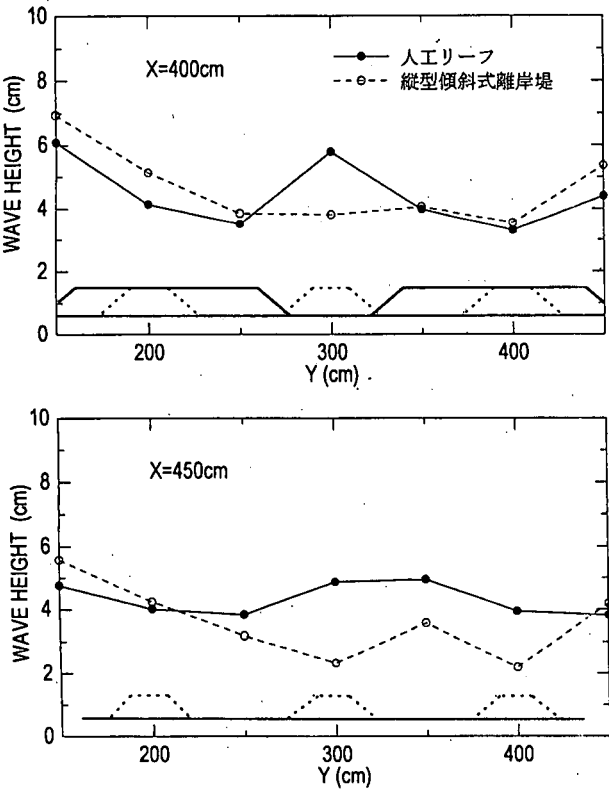


図-4 実験による波高分布の比較

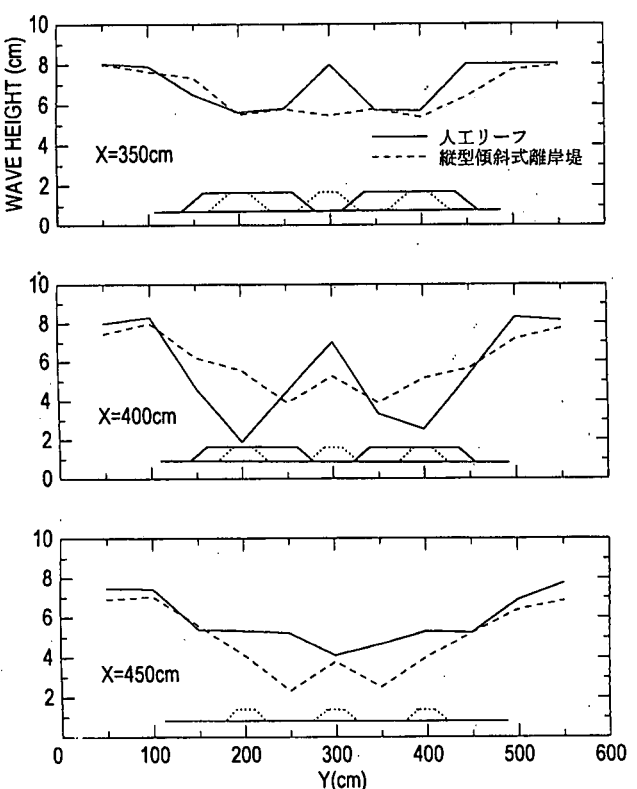
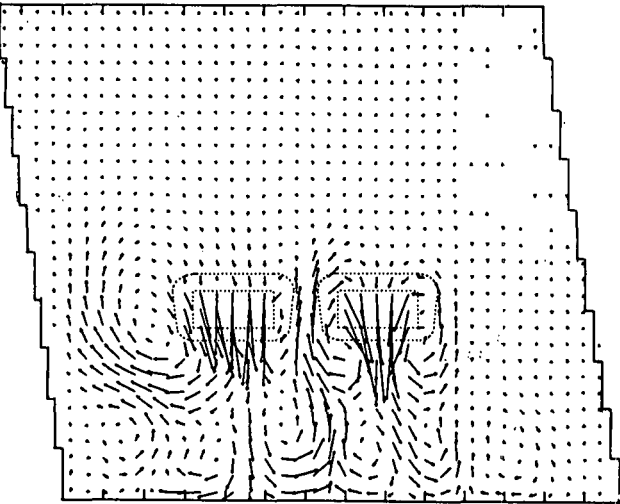


図-5 計算による波高分布の比較

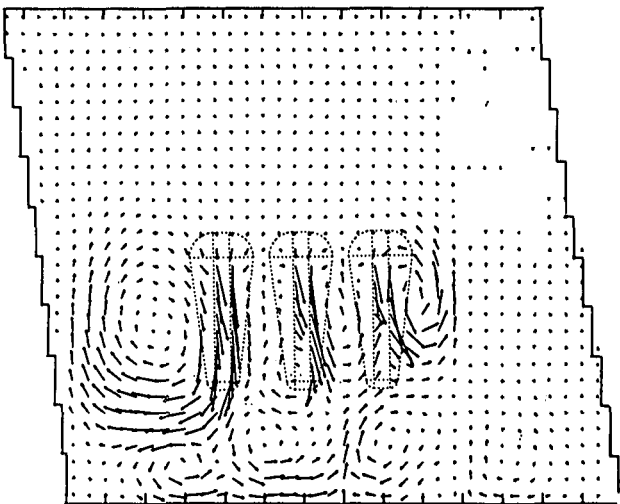
3. 2 数値計算によって得られた流況図の比較

図-6、図-7はそれぞれ縦型傾斜式離岸堤、人工リーフを設置した場合の流況図である。構造物の設置における流れの変化が引き起こす問題は、大別して2つ挙げられる。1つ目は、開口部を設けることによる冲向きの流れの発生であり、計算結果からは人工リーフを設置した場合において卓越しているのが確認される。これは、リーフ上で碎波し発生する流れを補償するための離岸流が、開口部において顕著に現れると考えると、人工リーフは天端長が縦型傾斜式離岸堤に比べて長いため、岸沖方向の流れを支配する沿岸方向の断面積が、縦型傾斜式離岸堤を設置した場合よりも狭小となり、このため流れがより卓越すると考えられる。2つ目は、沿岸流の発生である。これに関しては、どちらの構造物を設置した場合においても大きな差は見られない。

なお、表-1、表-2は開口部に生じる冲向きの流れおよび沿岸流の最大値を、4種類の造波条件に対し、実験値・計算値の別でまとめたものである。これによると、上で述べたような開口部での沖方向流れの相違は見当たらない。これは、人工リーフを設置した実験においては導波板とリーフの間で、強い離岸流が発生したため沖に向かう流れが分散されたためであると考えられる。



← 50cm/s
図-6 人工リーフ設置時の流況図 (計算)



← 50cm/s
図-7 縦型傾斜式離岸堤設置時の流況図 (計算)

表-1 開口部に生じる冲向きの流れの最大値

入射条件	波の種類	人工リーフ設置時の最大流速		縦型傾斜式離岸堤設置時の最大流速	
		実験値	計算値	実験値	計算値
H=5.5cm,T=1.6s	規則波	16.1 cm/s	26.5 cm/s	15.7 cm/s	16.5 cm/s
H=7.5cm,T=1.2s	規則波	21.2 cm/s	20.6 cm/s	24.2 cm/s	24.5 cm/s
H _{1/3} =5.5cm,T _{1/3} =1.6s	不規則波	8.5 cm/s	13.2 cm/s	8.3 cm/s	10.5 cm/s
H _{1/3} =7.5cm,T _{1/3} =1.2s	不規則波	12.0 cm/s	28.5 cm/s	11.4 cm/s	15.0 cm/s

表-2 沿岸流の最大値

入射条件	波の種類	人工リーフ設置時の最大流速		縦型傾斜式離岸堤設置時の最大流速	
		実験値	計算値	実験値	計算値
H=5.5cm,T=1.6s	規則波	18.8 cm/s	30.9 cm/s	15.8 cm/s	26.5 cm/s
H=7.5cm,T=1.2s	規則波	15.4 cm/s	23.5 cm/s	15.2 cm/s	28.5 cm/s
H _{1/3} =5.5cm,T _{1/3} =1.6s	不規則波	10.1 cm/s	14.7 cm/s	11.8 cm/s	25.0 cm/s
H _{1/3} =7.5cm,T _{1/3} =1.2s	不規則波	9.6 cm/s	19.8 cm/s	11.3 cm/s	22.5 cm/s

なお、人工リーフおよび縦型傾斜式離岸堤の先端部の設置水深はおよそ13~15cmであり、現地構造物の1/30~1/50縮尺に相当する。したがって、上記の流速は現地換算では5~7倍となる。

4 現地地形における人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の比較

4. 1 地形および構造物の設定

実際の海岸を想定して、数値計算プログラム中に設定した地形が図-8である。側方境界の影響を緩和するため沿岸方向の距離は岸沖方向に比べて十分に長くとり、勾配 1:50 の海底に天端長 150m・天端幅 40m の人工リーフ 2 基および天端長 20m・天端幅 65m の縦型傾斜式離岸堤 7 基を、それぞれ図-8のように配置した。なお、人工リーフ 2 基の総体積は 63370m³、縦型傾斜式離岸堤 7 基の総体積は 61928m³である。また、どちらの構造物の天端水深も 1.5m とし、前後斜面の勾配は 1:2、側斜面の勾配は 3:10 と設定した。図中の導波板は、海浜流場についての数値計算において設定したものであり、今回の波浪場の計算において求まる波高分布に対しては影響を与えていない。

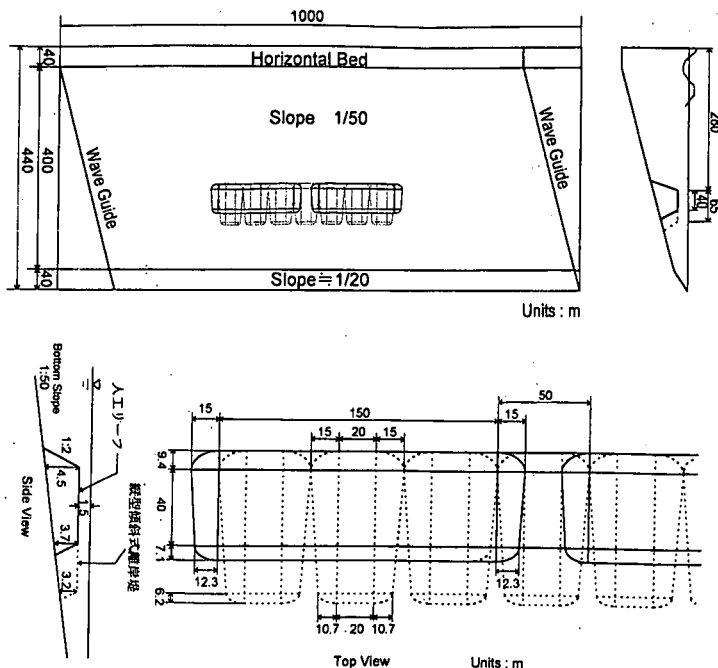


図-8 人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の配置図および寸法

4. 2 エアリーフと縦型傾斜式離岸堤周辺の波高分布の比較

この地形に、日本海の弱いうねり性の波を想定し入射させ、数値計算によってリーフ周辺の波高分布を求めたのが図-9である。X=280mの測線は、人工リーフおよび縦型傾斜式離岸堤の天端の先端にあたり、勾配1:50の海底における水深は5.2mである。また、波は不規則波とし、入射波高 $H_{1/3}=1\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=8\text{s}$ （図中左）および入射波高 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=8\text{s}$ （図中右）の2種類の波を対象とした。なお、勾配0と勾配1/50のそれぞれの海底の境界部において 15° の入射角を設定するため、境界部での屈折を考慮して入射角は 21.4° とした。

人工リーフは、低波浪に対して減衰効果が小さいことが既に指摘されているが、このことは図-9の計算結果からも確認される。すなわち、 $H_{1/3}=3\text{m}$ においては、人工リーフ上で波高が $1/3$ 以下に抑えられるのに対して、 $H_{1/3}=1\text{m}$ においては 30%程度の低減にとどまっている。これに対して縦型傾斜式離岸堤設置時では $H_{1/3}=1\text{m}$ においても、開口部における波を屈折させることで、波を天端上に集めて効率よく碎波させており、この結果、背後水域において波高が 50%以上低減していることが確認される。また、 $H_{1/3}=3\text{m}$ における波高分布は、平均的にはどちらの構造物を設置した場合でも、同程度に波を低減させていると考えられる。

5 結論

縦型傾斜式離岸堤についての既往の研究結果に対して、人工リーフを設置した実験および数値解析を行い比較・検討することにより、以下のような人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水理特性の違いが確認された。

- (1) 縦型傾斜式離岸堤がその背後水域において波高を減衰させる効果は、人工リーフを設置した場合と比べて、同等かそれ以上であると考えられる。
- (2) 縦型傾斜式離岸堤は、波の進行方向によっては波高を減衰させる効果が低減する。これに対して、人工リーフは天端上で波の峰を揃える効果を有し、入射方向による機能の低下はないと考えられる。
- (3) 沿岸流の発生に関しては、どちらの構造物を設置した場合においても大差は見当たらない。また、開口部における冲向きの流れについては、縦型傾斜式離岸堤を設置した場合の方が低減すると思われるが、さらに綿密な実験を行う必要があると考えられる。

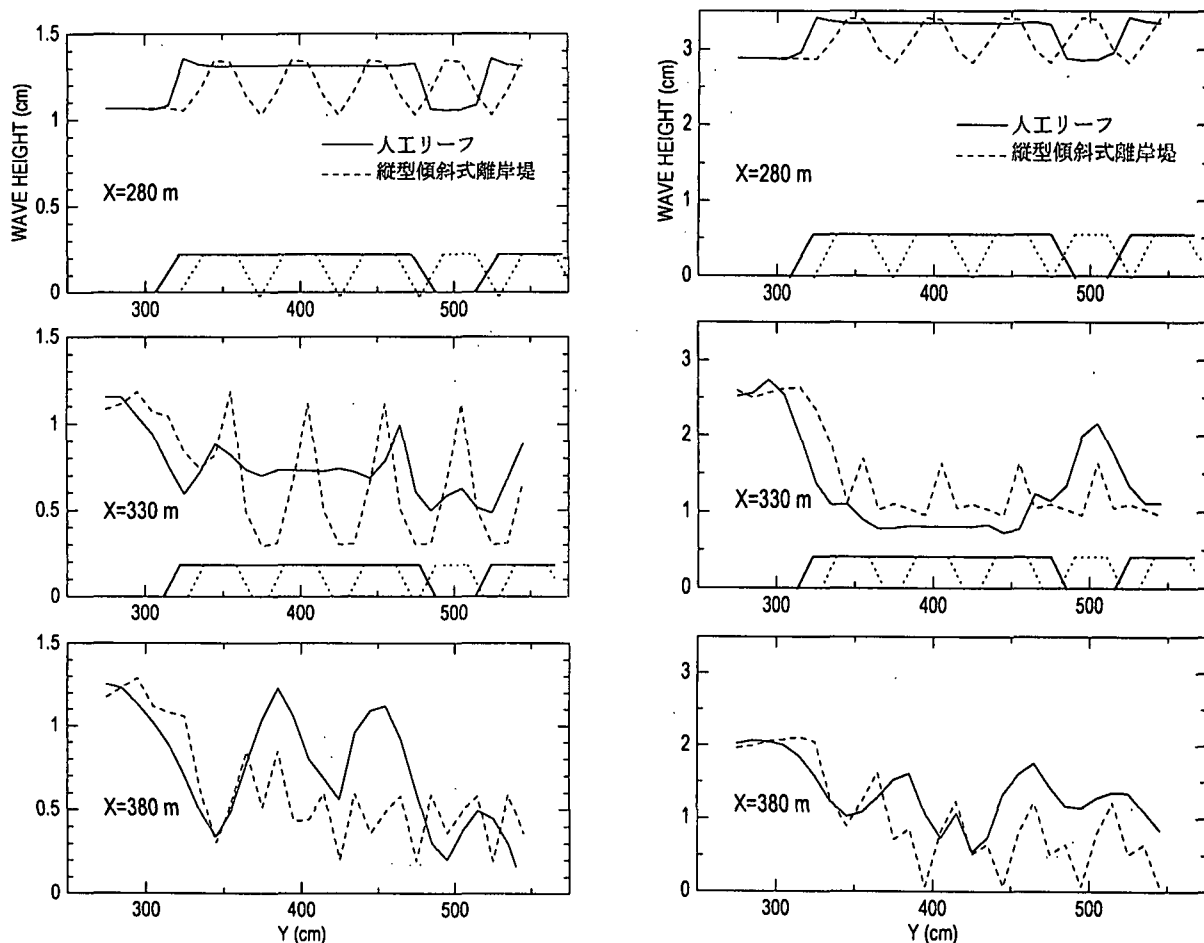


図-9 沿岸方向の測定断面における波高分布の比較 (左: $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 右: $H_{1/3}=3.0\text{m}$)

<参考文献>

- 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.
- 宇多高明・小俣篤・横山揚久(1987): 人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.337-341.
- 合田良実・山田晶子(1992): 屈折効果を利用した縦型傾斜式離岸堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.566-570.
- 合田良実・高橋真介・高橋栄司(1994): 放物型方程式による縦型傾斜式離岸堤周辺波浪場の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.986-990.
- 合田良実・吉崎龍太郎・原田智弘(1996): 縦型傾斜式離岸堤システム周辺の波高分布と海浜流について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.121-125.