

環境保全型潜堤に関する実験的研究

A Study on Environmental Submerged Breakwaters

奥蘭 英明*・高橋 克佳**・阿部 孝行*・前田 建***・我原 弘昭***
Hideaki Okuzono, Katsuyoshi Takahashi, Takayuki Abe, Tateshi Maeda and Hiroaki Gahara

This paper discusses submerged breakwaters with cylindrical fish reefs. Various model tests were carried out to investigate regular and irregular wave transmissions. The tests revealed several fundamental principles about the wave transmission of the reef-type breakwaters. When the reef crest width is large, the wave dissipation can be expected to have a wide range of relative crest depths because of the function of the waves breaking on the crest. The transmission coefficient of the environmental submerged breakwater becomes slightly smaller than for the normal submerged breakwater.

Keywords: Submerged breakwater, Fish reef, Wave dissipation

1.はじめに

近年、漁場や生態系への配慮、景観保全並びに海洋性レクリエーションの場の創出など種々の要請から、構造物を海面上に出さないで波浪を制御する人工リーフや潜堤などを設置する海岸が増加している¹⁾²⁾。人工リーフには、来襲波の減衰、海岸浸食防止といった海岸保全施設としての本来の機能に加えて、水産資源の増殖機能や生態系保全のための水質浄化機能などが期待できる³⁾⁴⁾。本研究では、幅広潜堤内に円筒形ブロックを配列し、海岸保全だけでなく漁業との共存と調和をめざす環境保全型潜堤の水利模型実験を行い、円筒形蛸集施設付き潜堤の規則波による堤体近傍での碎波状況、従来型潜堤と円筒形蛸集施設付き潜堤の規則波と不規則波に対する伝達率の特性を比較検討し、さらには規則波による円筒形ブロック内の流況と流速についても考察する。

2.実験装置及び実験方法

実験は、図-1に示すような水路長17.8m、水路高70.0cm、水路幅40.0cmの二次元水槽に、勾配1/20の合板製の水路床に続いて高さ30.0cmの水平模型床を設置し、その上に写真-1に示すような、基礎捨石とXブロックからなる従来型のXブロック潜堤と写真-2に示すような、Xブロック潜堤の中央部に円筒形ブロックを組み込んだ円筒形蛸集施設付き潜堤を設置した。天端高さは10cm、法面勾配は1:1.5とした。模型縮尺は1/50を想定し、Xブロックは縦69mm×横69mm×高さ23.5mm、重量162.96g、円筒形ブロックはアルミニウム製で直径80mm×高さ60mm×壁厚8mm、重量265.65gの円筒形で、壁面には空隙率が4%になるように直径11.3mmの穴を4箇所と直径16mmの半円を4箇所あけた。この8箇所の穴をあけたのは、円筒形ブロック内の海水交換と、生物が各円筒形ブロック内を自由に移動できるようにするためである。また移動が容易にできるように、円筒形ブロックは千鳥に並べた。入射波高計は、造波板から195.0cmの地点に設置し、伝達波測定用の波高計は潜堤天端後端より110.0cmの地点に設置した。

入射波の実験条件を表-1に示す。規則波の入射波高 H_i は、入射波高計で有効波内の連続した3波を読み取り平均して決定し、伝達波高は伝達波測定用の波高計で入射波に対応した3波により求めた。不規則波の入射波のスペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルとし、伝達波の有義波高 $H_{1/3}$ を、ゼロアップクロス法により求めた。伝達率は、伝達波高と入射波高の比より求め、合計192ケースの規則波と不規則波による伝達率測定実験を行い、Xブロック潜堤と円筒形蛸集施設付き潜堤の伝達率の特性を比較した。

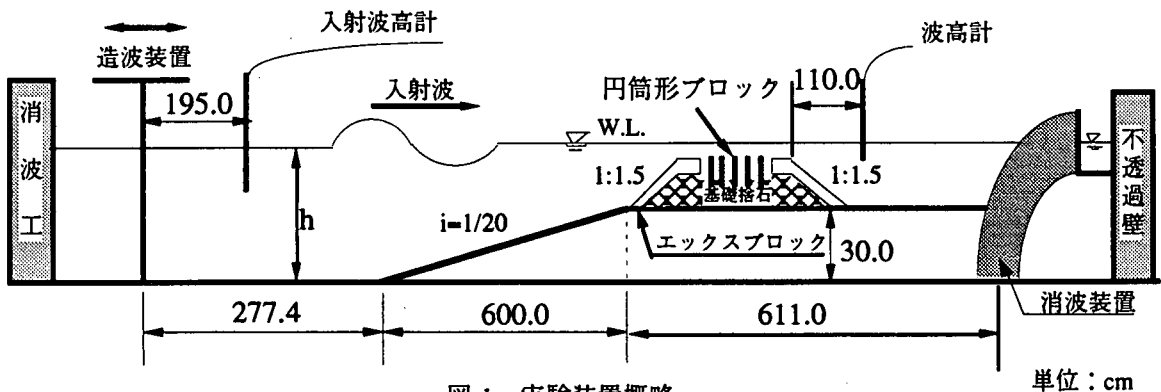


図-1 実験装置概略

単位: cm

- * 正会員 九州産業大学工学部土木工学科 (813 福岡市東区松香台2-3-1)
** 学生会員 九州産業大学工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 (株) テトラ



写真-1 Xブロック潜堤

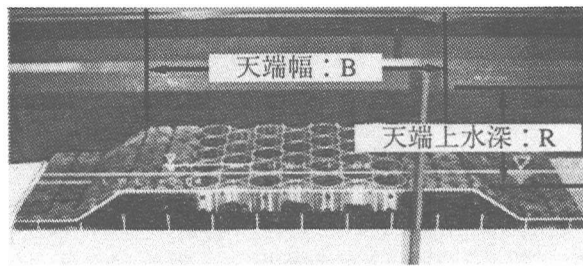


写真-2 円筒形蛸集施設付き潜堤

表-1 実験条件

	規則波	不規則波
天端上水深: R (cm)	0.0~6.0	0.0~6.0
潜堤天端幅: B (cm)	42.0~119.0	77.0
水深: h (cm)	40.0~46.0	40.0~46.0
入射波周期: T, $T_{1/3}$ (sec)	0.566~1.414	0.566~1.414
入射波高: H_i , $H_{1/3}$ (cm)	2.01~16.17	1.67~8.20

表-2 実験条件

天端上水深: R (cm)	0.0~6.0
潜堤天端幅: B (cm)	42.0~119.0
水深: h (cm)	40.0~46.0
入射波周期: T (sec)	0.566~1.414
入射波高: H_i (cm)	2.01~16.17

また、堤体近傍での碎波状況をビデオ撮影し、画像より碎波点を求めた。測定基点0は潜堤天端上の前端部とし、沖側を(－)、岸側を(＋)として示した。

円筒形ブロック内の流速の測定は、表-2の実験条件について、電磁流速計で行った。測定は、写真-3に示すような、堤体幅 $B=77.0\text{cm}$ の円筒形蛸集施設付き潜堤において、沖側最前列の円筒形ブロック番号(1)番から(7)番の円筒形ブロックの中心線上で行った。測定水深は、円筒形ブロック(1)では堤体天端の $\pm 0.0\text{cm}$ の位置と、それより -2.0cm 、 -4.0cm の円筒形ブロック内の3箇所とし、(2)～(7)では -2.0cm のみで測定を行った。ここでいう流速とは、一周期内の最大水平流速であり、有効波の範囲内から5波読み取り最大値と最小値を除いて3波を平均して求めた。また、円筒形ブロック内流況についても観測を行い、沖側より3列目のガラス側壁面に接した円筒形ブロック1個を透明のプラスチック製のものに置き換え、ビデオカメラで接写するとともに目視観測した。また、流れを可視化するために直径 4mm 、比重 0.93 のペイント吹き付けのプラスチック粒子を散布した。

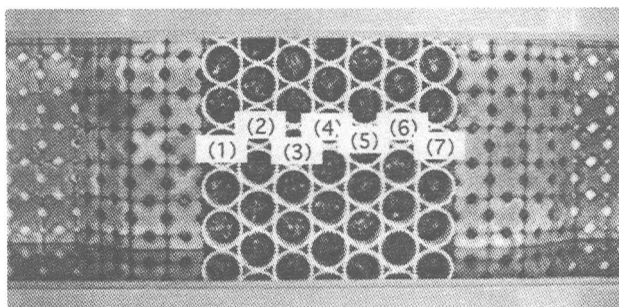


写真-3 流速測定位置

3. 堤体近傍での碎波状況

図-2は、天端幅 $B=77.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.414\text{sec}$ において、規則波の入射波高 H_i を変化したときの、碎波点の位置を示す。天端上水深 $R=2.0\text{cm}$ についてみれば、 $H_i=16.2\text{cm}$ における碎波点は堤体から沖側へ最も遠く離れた -155.0cm であり H_i が小さくなるに従って碎波点は岸方向に移動し、 $H_i=6.0\text{cm}$ より小さくなると潜堤上で碎波する。また、 $R=4.0$ 、 6.0cm と大きくなるに従って碎波点は岸方向に移動する傾向がみられる。

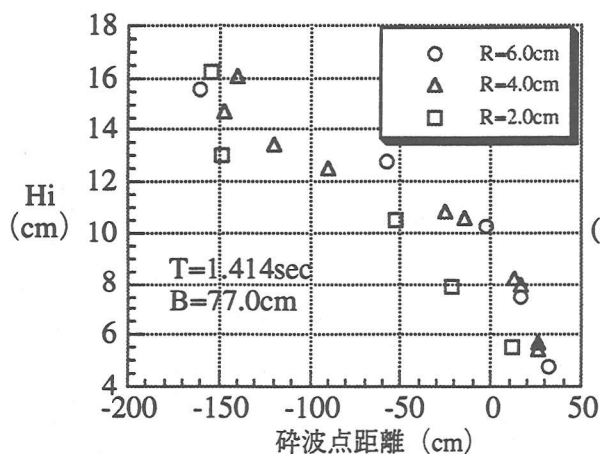


図-2 H_i と碎波点の位置

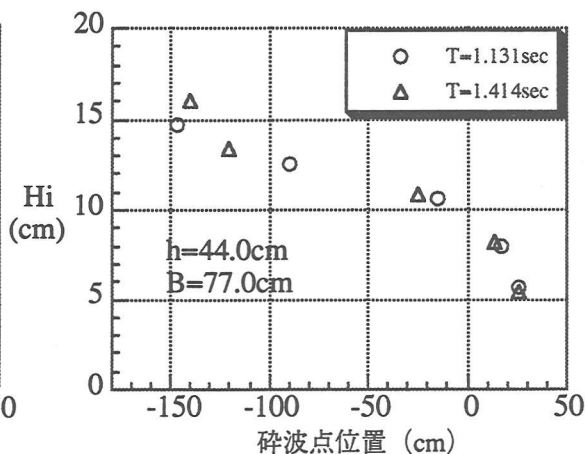


図-3 周期 T をパラメータとしたときの H_i と碎波点の位置

図-3は、水深 $h=44.0\text{cm}$ 、天端幅 $B=77.0\text{cm}$ において、周期 $T=1.131$ 、 1.414sec の碎波点の値を示した。同一の入射波高であれば $T=1.131\text{sec}$ の波の方が、 $T=1.414\text{sec}$ の波よりもやや岸側において碎波する傾向がみられる。他の周期の目視観測も参考にすると、周期が短くなるに従って、碎波点は岸側に移動することが一般的にいえる。

4.入射波に対する伝達率の特性

図-4、5は、天端幅 $B=77.0\text{cm}$ の場合について、縦軸を伝達率 K_t 、横軸を天端上水深 R と入射波高 H の比とし、規則波と不規則波の周期をパラメータとして示した。図中の曲線はこれらのデータに対する最小自乗曲線である。

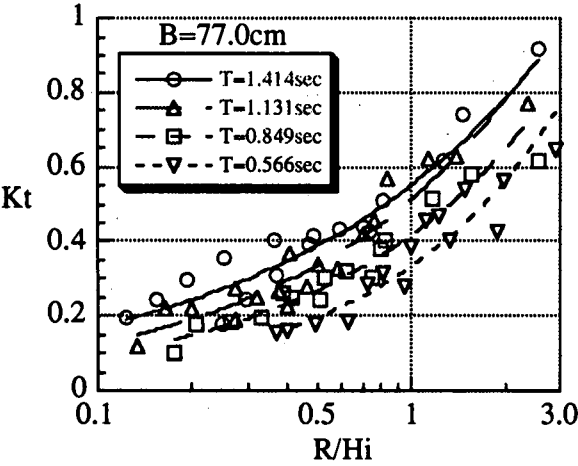


図-4 規則波の周期をパラメータとしたときの K_t と R/H の関係

規則波と不規則波の伝達率は R/H が大きくなるに従って大きくなり、周期が短くなるに従って K_t は小さくなる。伝達率が R/H の増加とともに急激に大きくなるのは、 R に比べて H が小さいときには非碎波か小規模碎波の波が潜堤上を比較的能量消費が小さいままに進行し、 H が大きいときには入射波は潜堤上または潜堤より沖側で碎波し、エネルギー消費が大きくなるためである。また、 $R/H<0.5$ になると規則波、不規則波ともに入射波の周期によらず $K_t<0.4$ となり波浪制御効果が大きいことがわかる。

図-6は、天端幅 $B=77.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.414\text{sec}$ において、縦軸を K_t 、横軸を R/H として規則波と不規則波を比較したものである。規則波と不規則波ともに、 K_t は R/H が大きくなるに従って大きくなり、不規則波のほうが R/H の増加に伴って、伝達率がやや小さいことがわかる。

図-7は、周期 $T=1.414\text{sec}$ の規則波について、縦軸を K_t 、横軸を R/H とし、天端幅をパラメータとして示した。 K_t は R/H が大きくなるにしたがって大きくなり、天端幅が大きくなるに従って K_t は小さくなることがわかる。しかし、天端幅を2倍にしたからといって、伝達率が半減するわけではなく、潜堤上を波が長く進行してもエネルギー減衰はあまり期待できない。また、 $R/H<0.3$ になると、 $B=42.0\text{cm}$ のときを除いて $K_t<0.4$ となり波浪制御効果が大きいことがわかる。

図-8は、 $B=77.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.414\text{sec}$ の規則波について縦軸を K_t 、横軸を R/H とし、Xブロック潜堤と円筒形蟬集施設付き潜堤の比較をしたものである。伝達率は、Xブロック潜堤と円筒形蟬集施設付き潜堤ともに R/H が大きくなるに従って大きくなるが、円筒形蟬集施設付き潜堤の方が伝達率がやや小さいことがわかる。

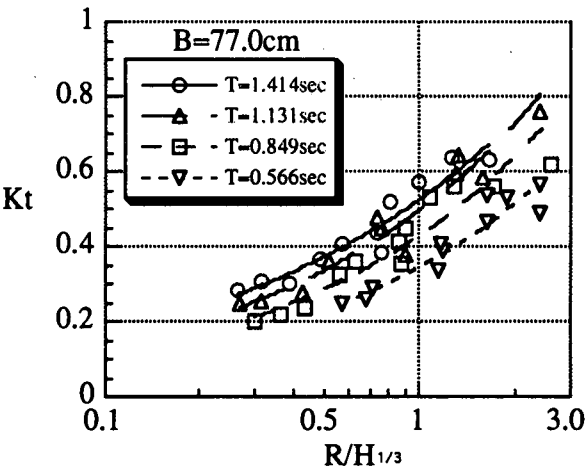


図-5 不規則波の周期をパラメータとしたときの K_t と $R/H^{1/3}$ の関係

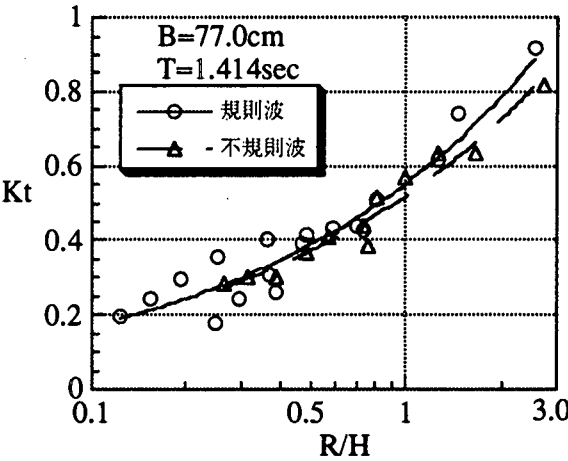


図-6 規則波と不規則波の K_t の比較

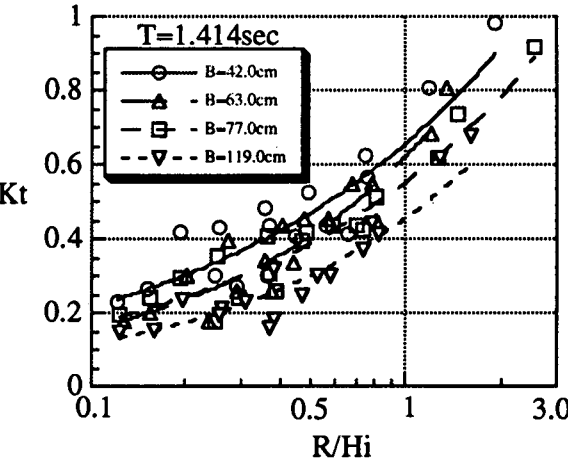


図-7 天端幅をパラメータとしたときの K_t と R/H の関係（規則波）

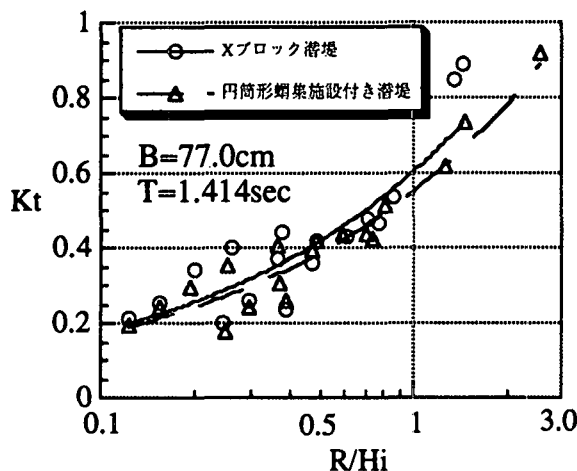


図-8 Xブロック潜堤と円筒形蛸集施設付き
潜堤の K_t の比較（規則波）

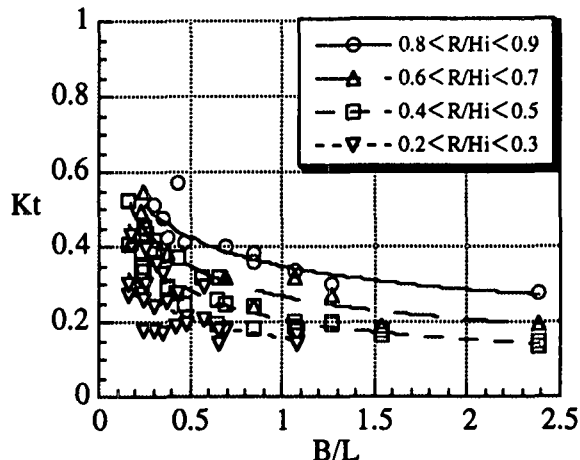


図-9 R/H_i をパラメータとしたときの K_t と
 B/L との関係（規則波）

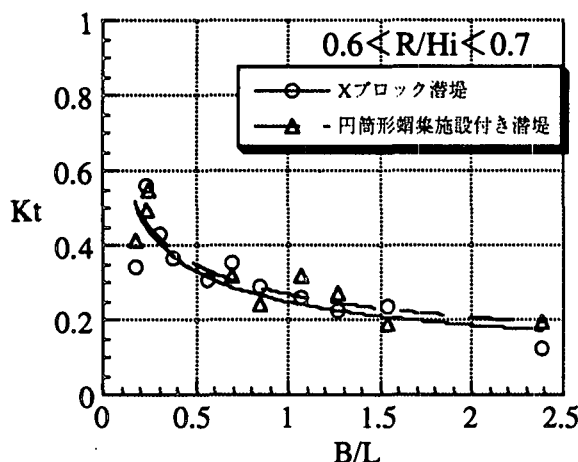


図-10 Xブロック潜堤と円筒形蛸集施設付き
潜堤の K_t の比較（規則波）

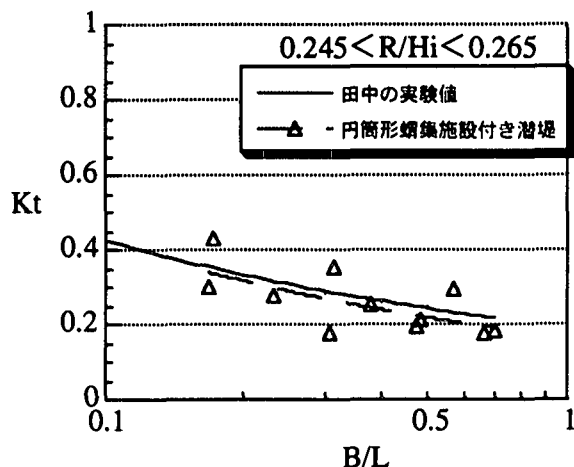


図-11 田中の実験値⁵⁾との比較
（規則波）

図-9は、縦軸を K_t 、横軸を天端幅 B と規則波の波長 L の比とし、 R/H_i をパラメータとして示した。 K_t は B/L が大きくなるに従って減少するが、その減少の傾向は B/L が大きくなるほど緩やかになる。 K_t は、 $B/L > 1.0$ では、あまり変化がみられず、天端幅を必要以上に広くとることは不経済となることがわかる。

図-10は、縦軸を K_t 、横軸を B/L とし、規則波の $0.6 < R/H_i < 0.7$ の条件のときのXブロック潜堤と円筒形蛸集施設付き潜堤を比較したものである。両者の K_t は、 B/L が変化してもほぼ同様な値を示すことがわかる。

図-11は、縦軸を K_t 、横軸を B/L とし、規則波の $0.245 < R/H_i < 0.265$ の条件のときの円筒形蛸集施設付き潜堤と田中の実験値⁵⁾を比較した図である。円筒形蛸集施設付き潜堤の方が K_t はやや小さいことがわかる。

5. 円筒形ブロック内の流況と水深方向の流速の変化

図-12は、水深が $h=44.0\text{cm}$ のとき、円筒形ブロック(1)内の岸向き(+)と沖向き(-)の最大水平流速 V (cm/s)の実験値を示した。潜堤天端幅は $B=77.0\text{cm}$ であり、周期 $T=1.414\text{sec}$ 、入射波高 $H_i=2.8\sim 16.0\text{cm}$ の規則波に対する円筒形ブロック内の上部 $\pm 0.0\text{cm}$ 、中央部 -2.0cm 、下部 -4.0cm での値を示す。円筒形ブロック内上部の岸向き流速 V (○印)をみると、入射波高が $H_i=2.8\text{cm}$ から大きくなるに従って、 V は大きくなり、 $H_i=8.2\text{cm}$ で最大値 54.4cm/s を示し、 H_i がさらに大きくなると V は小さくなる傾向にある。円筒形ブロック内中央部(△印)と下部(□印)の入射波高増大

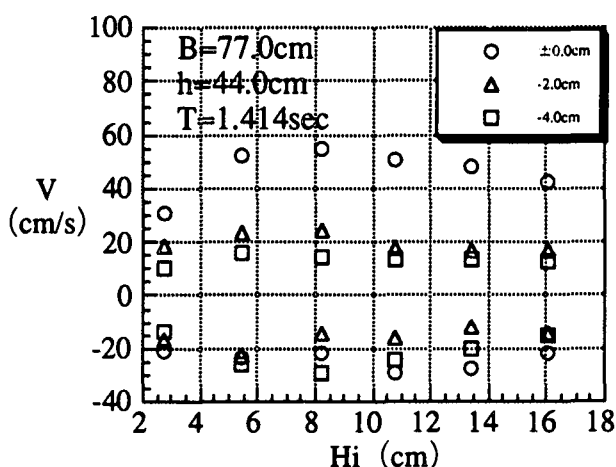


図-12 円筒形ブロック(1)における流速と
入射波高の関係

に伴う岸向きの水平流速の変化は、円筒形ブロック内上部のそれとほぼ同様であるが、最大値はそれぞれ24.0cm/sと16.0cm/sになり、円筒形ブロック内下方ほど小さくなることからわかる。一方、円筒形ブロック内の冲向きの水平流速についてみれば、入射波高増大に伴う流速の変化は、岸向きの流速と同様な傾向を示す。しかし、円筒形ブロック内上部での冲向き流速は岸向きと比較して小さく、 $H_i=10.8\text{cm}$ で最大値29.6cm/sである。円筒形ブロック内下部の冲向きの流速は $H_i=2.8\text{cm}$ のときを除いて、円筒形ブロック内中央部の値よりも大きく、円筒形ブロック内下部の岸向きの流速よりも大きい。この理由を、入射波ごとの碎波状況と円筒形ブロック内の流況とともに説明するとつぎのようになる。

入射波高が $H_i=2.8\text{cm}$ では、波は碎波しないで潜堤上を進行する。このため、円筒形ブロック内には波の山が通過直後に小規模の渦が発生する。岸向き、冲向きの流速はともに小さい。 $H_i=5.4\text{cm}$ では、波は潜堤上で小さく碎波する。円筒形ブロック内中央部に中規模の渦が発生し、岸向き、冲向きの流速はともにやや大きくなる。

$H_i=8.2\text{cm}$ では、波は沖側より(4)番目の円筒形ブロック付近に巻波の状態できく碎波し、円筒形ブロック内には、上部で岸向き、下部で冲向きの流速成分をもつ大きな渦が発生する。このため、円筒形ブロック内上部での岸向きの流速は大きくなる。しかし、冲向きの流れは単なるもどり流れであり、値は比較的小さい。円筒形ブロック内下部では、波の山が通過するとき、渦に伴う冲向きの大きな流速となる。このとき、円筒形ブロック内中央部は渦の中心部となり冲向きの流速は下部の値よりも小さくなる。 $H_i=10.8\text{cm}$ では、波は潜堤の沖側斜面付近で碎波したあと、潜堤上を渦をまいた状態で進行する。波の先端が円筒形ブロック上を通過しはじめるとほぼ同時に円筒形ブロック内に渦が発生するが、その規模は小さく流速も減少する。 $H_i=13.4\text{cm}$ では、碎波後の波が潜堤上を渦をまいて進行するが、円筒形ブロック内の渦は $H_i=10.8\text{cm}$ のときよりもさらに勢いがなくなる。

$H_i=16.0\text{cm}$ では、波は潜堤よりはなれた沖の方で碎波し、碎波後の波が乱れながら潜堤上を進行する。 $H_i=10.8\text{cm}$ や 13.4cm のような大きな渦はまかず、円筒形ブロック内の渦は発生するが勢いはさらになくなり、流速もさらに小さくなる。

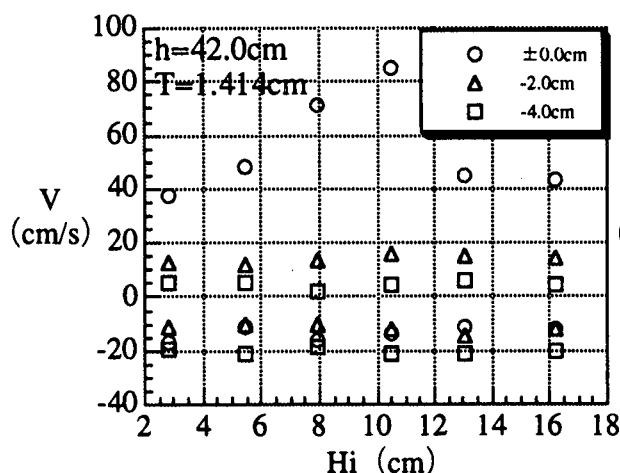


図-13 円筒形ブロック(1)における流速と入射波高の関係

図-13は、水深が $h=42.0\text{cm}$ の岸向きと冲向きの最大水平流速を示す。水深以外の条件は図-12の $h=44.0\text{cm}$ の場合と同じである。入射波高 $H_i=10.5\text{cm}$ のとき、今回の実験範囲での最大流速 $V=85.2\text{cm/s}$ の結果を得た。このように大きな値となったのは、先に示した $h=44.0\text{cm}$ よりも水深が浅く、碎波の状況が異なるためである。図-14に、水深が $h=44.0\text{cm}$ で周期が $T=1.131\text{sec}$ とやや短くなった場合を示す。

このように、円筒形ブロック内の流況流速は、入射波の碎波状況によって大きく変化するが、円筒形ブロック内中央部と下部（円筒形ブロック下端から上方2/3までの部分）での流速は、円筒形ブロック天端付近の流速に比べて十分小さく、今回の実験範囲内では $V=40.0\text{cm/s}$ を超えることはない。

図-15は、水深が $h=44.0\text{cm}$ のとき、周期 $T=1.414\text{sec}$ 、入射波高 $H_i=2.75\sim 16.04\text{cm}$ の波に対する、各円筒形ブロック

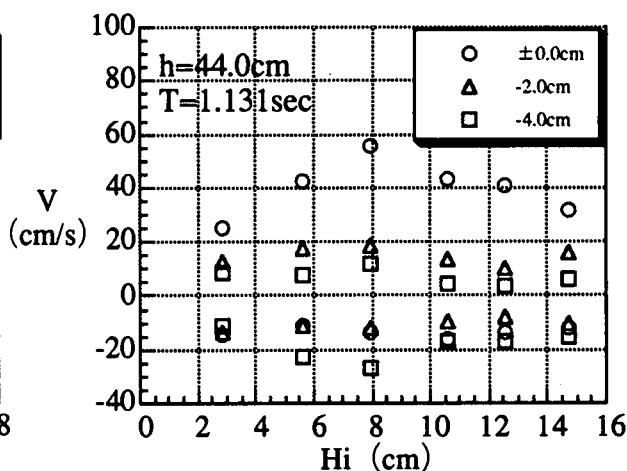


図-14 円筒形ブロック(1)における流速と入射波高の関係

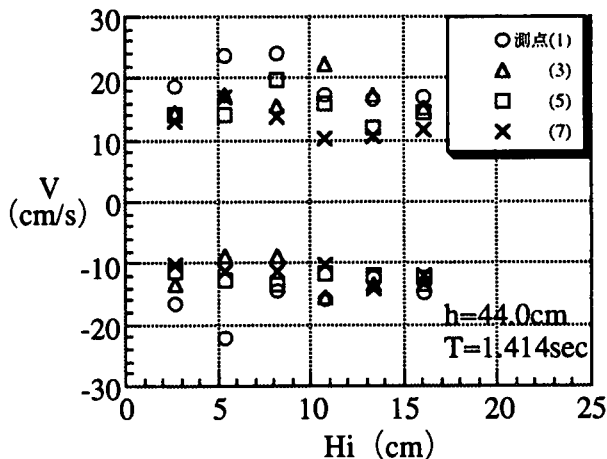


図-15 流速の測点ごとのVとHiの関係

内の中央部-2.0cmでの値を、縦軸 V (cm/s)、横軸を H_i (cm) とし、流速測点ごとに示す。岸向き水平流速 V をみると、入射波高 $H_i=2.75$ cmから大きくなるに従って V は大きくなり、円筒形ブロック(1)では $H_i=8.21$ cmで最大値 24.0 cm/sを示し、 H_i がさらに大きくなると V は小さくなる傾向にある。各円筒形ブロック内においても、岸向き水平流速は同様な傾向を示し、その値は岸よりの円筒形ブロックほど小さくなる。これは、砕波後の波が潜堤上を伝搬するに従って波のエネルギーが消費されることによる。冲向きの水平流速 V をみると、入射波高増大に伴う流速の変化は、岸向きの流速とはほぼ同様な傾向を示すが値はさらに小さくなる。

6. むすび

潜堤近傍での砕波状況、伝達率および円筒形ブロック内の流況、流速について実験を行ったが、これらの結果をまとめると以下ようになる。

(1) 砕波状況について

円筒形蟬集施設付き潜堤においては、入射波高が大きいと潜堤より沖方向へ遠くはなれた位置で砕波し、入射波高が小さくなるに従って、砕波点は順次岸方向へ移動し、潜堤上で砕波するようになる。さらに入射波高が小さくなると砕波しなくなる。また、潜堤の天端上水深が大きいほど、また入射波の周期が短いほど砕波点の位置は岸方向へ移動する。

(2) 伝達率について

円筒形蟬集施設付き潜堤においては、伝達率 K_t は潜堤付近での砕波状況に大きく影響され、天端上水深と入射波高の比 $R/H < 0.3$ では、天端幅 $B=42.0$ cmを除いて $K_t < 0.4$ となり消波効果が高い。また天端幅と入射波長の比 B/L が大きくなるに従って伝達率は減少するが、その減少傾向は B/L が大きくなるほど緩やかになり、 $B/L > 1.0$ では K_t はあまり変化はなく、必要以上に天端幅をとる必要はない。伝達率は円筒形蟬集施設付き潜堤の方が従来のXブロック潜堤に比べてやや小さく、規則波と不規則波の比較では不規則波の値の方がやや小さい。

(3) 円筒形ブロック内の流況、流速について

波の山が潜堤上を通過するとき、円筒形ブロック内には上部で岸向き、下部で冲向きの流速成分をもつ渦が発生する。渦の規模と勢いは、入射波高によって大きく異なり、岸向き冲向きの流速ともに波が潜堤上で砕波するとき最大となる。しかし、今回の実験範囲内では、円筒形ブロック下端から上方 $2/3$ までの円筒形ブロック内における流速は 40 cm/s (現地換算で 2.8 m/s) を超えることはなく、円筒形ブロック内の流速が生物の棲息環境に悪影響を及ぼすことはないと考えられる。

参考文献

- 1) 浜口達男、宇多高明、井上 力、五十嵐 晃、中山 修：人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験、第35回海岸工学 講演会論文集、pp.128～132、1988
- 2) 中山哲蔵：人工リーフに関する実験的研究：水産工学研究所技報第15号、pp.45～51、1993
- 3) (社) 水産土木建設技術センター：水産生物涵養型人工リーフ整備マニュアル (案) 要約版、pp.37～41、1993
- 4) (社) 全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き、pp.30～32、1992
- 5) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について、第23回海岸工学講演会論文集、pp.152～157、1976