

一様傾斜海浜への最適な人工リーフ設置条件

神原 幸雄*・谷川 敬芳**・折坂 瑞代***・安田 孝志****

1. はじめに

没水型構造物によって入射波を碎波させ波浪減勢を図る波浪制御工法は、跳水を利用した減勢工に対応するものであり、原理的に優れた手法であると考えられる。

著者らはこれまでに一定水深上に設置した潜堤や矩形リーフ、台形潜堤や一様斜面等で生じる碎波現象についてその支配法則の解明や碎波形式の定式化を始めとする様々な検討を行ってきており、共著の安田らは、ダブルリーフにより巨大な巻き込みジェットを伴う複合型碎波が生じることを発見するに至っている(安田ら, 1995 a)。

ところが、これら構造物による実際の波浪制御を考えた場合には、一定水深上ではなく、ある勾配を有する斜面上へ設置されるのが大半であるにもかかわらず、その斜面勾配や斜面上の構造物設置位置が没水型構造物の波浪制御能に与える影響については未検討のままである。

そこで本研究では、一般海浜を単純化した一様傾斜面上に矩形リーフやダブルリーフを設置した場合について、斜面勾配や構造物設置位置の碎波制御能に与える影響について検討し、一様傾斜面上に構造物を設置する際の最適なリーフ設置条件についての明確化を試みる。

2. 計算方法・計算条件

ここでは前後の波の影響の無い孤立波を入射波として考え、これを図-1に示す (a) 矩形リーフ、(b) 斜面上に矩形リーフを設置した“斜面上リーフ”、(c) ダブルリーフおよび (d) 同じく斜面上にダブルリーフを設置した“斜面上ダブルリーフ”に入射させることにした。ただし、本研究では底面形状を単純化するため、一様傾斜面上に各種リーフを設置した場合にリーフ後方に現れる斜面部分については無視し、最上段のリーフは一定水深を保ち岸まで連続しているものとした。

さて、本研究にて用いる BIM (境界積分法) による数値計算手法の精度については、既に検証がなされている(安田ら, 1991)。そこで本研究ではこれを用いて以下に

示す計算条件に従って数値シミュレーションを実施することにした。

数値計算は、相対入射波高 $H_1/h_1=0.4, 0.5, 0.6$ の定常孤立波を斜面勾配 $\cot \theta=5\sim 120$ の一様斜面上に設置したリーフ相対設置高 $R_1/h_1=0.2\sim 0.6$ 、リーフ相対天端高 $R_2/h_1=0.6, 0.8$ の矩形リーフ、およびリーフ相対設置高 $R_1/h_1=0.4$ 、下段リーフ相対天端高 $R_2/h_1=0.6$ 、上段リーフ相対天端高 $R_3/h_1=0.8$ 、相対リーフ間距離 $X_1/h_1=1.0\sim 3.0$ のダブルリーフに入射させ行った。

また、斜面上リーフおよび斜面上ダブルリーフの斜面勾配・リーフ設置高等の入射波の碎波におよぼす影響を検証するために、一定水深上の矩形リーフおよびダブルリーフに対する数値計算も併せて行った。

ここで実施した数値計算は、エネルギー保存則に対する誤差を 3% 未満とした条件にてジェット落下限界

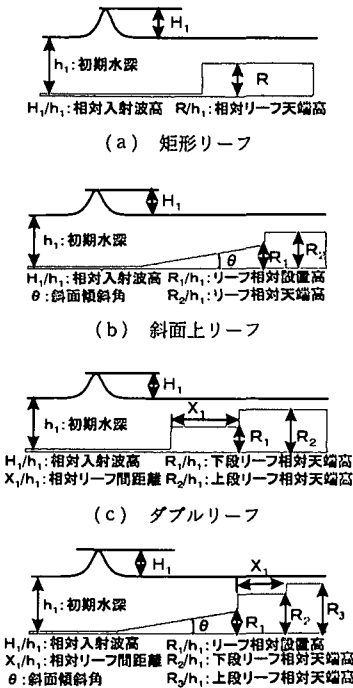


図-1 リーフの諸元と記号

* 正会員 工修 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科
** 正会員 安城市役所 (前 豊田工業高等専門学校 専攻科)
*** 石川県庁 (前 岐阜大学 工学部土木工学科)
**** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

(ジェットの下面が水平となる瞬間)に達するまで行うことにした。

3. 一様傾斜面上に設置した矩形リーフ

3.1 碎波特性

a) ジェット落下限界波形とジェットサイズ

図-2は、相対入射波高 $H_1/h_1=0.4, 0.5, 0.6$ の定常孤立波が、リーフ相対天端高 $R/h_1=0.8$ の矩形リーフおよび、これと同一天端高の矩形リーフを斜面勾配 $1/10 \sim 1/87$ の斜面上のリーフ相対設置高 $R_1/h_1=0.4$ となる位置に設置した斜面上リーフに入射した場合のジェット落下限界波形の比較を示しており、図中の太線が矩形リーフ、細線が斜面上リーフのものを表している。

また、ここでは各相対入射波高 H_1/h_1 に対してほぼ最大のジェットの規模を示す様に一定水深上の矩形リーフの相対リーフ天端高を設定したが、この矩形リーフを斜面上に設置した場合には、図示したすべての斜面勾配において一定水深上の矩形リーフの最大のジェットの規模を上回っていることが分かる。

このことは、図中に示した巻き込みジェットの規模を定量的に表す指標 $S_j = \eta_j \cdot \gamma / H_1^2$ (安田ら, 1995 a) の値からも読み取ることが出来るが、この指標 S_j で各相対入射波高における斜面上リーフの最大規模のジェットサイズを見てみると、これが一定水深上の矩形リーフのもののほぼ4～5倍に達していることが分かる。

また、この際の波形についても見てみると、波頂部付近にて載冠状複合波が形成されていることから、斜面上リーフにおいてもダブルリーフと同様の巨大なジェットを有する複合型碎波が発生することが確認できる。

以上より、斜面上リーフは矩形リーフに比べて生じる巻き込みジェットサイズも大きく、その際の碎波形式が複合型碎波となるなど、その碎波特性は既に知られているダブルリーフのものに非常に近い傾向を示している。

b) 複合型碎波

斜面上リーフにおいて現れている碎波特性は一定水深上に設置したダブルリーフによって生じるものとその傾向が近いことから、斜面上リーフにて発生した碎波、特に複合型碎波は、これまで報告されたダブルリーフによるものと異なるのか否かを調べるため、両者により生じる複合型碎波の波形の比較を行うことにした。

図-3は、相対入射波高 $H_1/h_1=0.5$ の孤立波に対して一定水深上に設置したダブルリーフのジェットサイズ指標 S_j と斜面上リーフの S_j がほぼ同じ値となる様な底面条件を数値計算結果の中からそれぞれ選び、ジェット落下限界波形の比較を行ったものの1例である。

比較の結果、両者の波形には主波峰背面部に僅かな差異が見られるが巻き込みジェット部は完全に一致してい

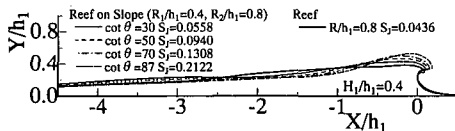
ることから、斜面上リーフは一定水深上に設置されたダブルリーフと全く同じ碎波能を有し、さらにダブルリーフと同等の複合型碎波も生じさせ得ることが分かった。

ところで、この図-3の比較における底面条件は、斜面上リーフのリーフ相対天端高やリーフ相対設置高とダブルリーフの上段リーフ相対天端高や上段リーフ相対設置高（この場合、下段リーフ相対天端高に等しい）が共に等しくなる様に設定してあるため、両者の底面条件で差異があるのはダブルリーフの下段リーフに関わる条件と一様斜面に関わる条件のみとなる。このことから、図-3のジェット落下限界波形の比較の結果、両者の波形が一致したのは、このダブルリーフの下段リーフと斜面上リーフの斜面の孤立波の碎波に与える影響力が同等であったためではないかと考えた。

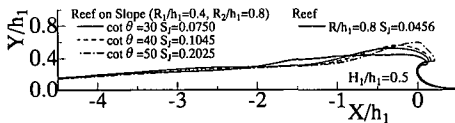
そこで図-4ではこれを確認するために、ダブルリーフの上段リーフおよび斜面上リーフのリーフに入射波峯が乗り上げる直前の両者の空間波形の比較を示す。

この結果、入射波峯のリーフ乗り上げ直前における両者の波形はほぼ一致していることが分かる。

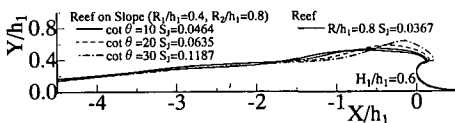
これは、下段リーフおよび斜面が入射波に対してほぼ



(a) $H_1/h_1=0.4$



(b) $H_1/h_1=0.5$



(c) $H_1/h_1=0.6$

図-2 矩形リーフと斜面上リーフのジェット落下限界波形の比較

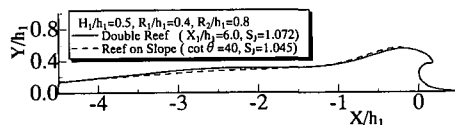


図-3 ダブルリーフと斜面上リーフのジェット落下限界波形の比較

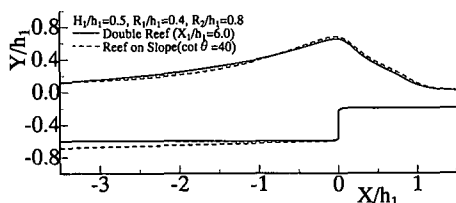


図-4 上段リーフ乗り上げ直前の空間波形の比較

同等の影響を及ぼしたことを示唆するものである。

3.2 斜面上への矩形リーフの設置条件

前節では、一様斜面上に矩形リーフを設置した場合、リーフ天端高だけでなく斜面勾配の入射波に及ぼす影響も重要であり、この双方の影響を正しく見積もることが出来れば斜面上リーフでもダブルリーフと同様の（複合型砕波を含む）砕波を発生させ得ることが分かった。

このことから、ダブルリーフ上にて波浪制御に有効とされる複合型砕波の波浪減勢効果（安田ら, 1995b）を斜面上リーフにて同様に利用できることは明確である。

そこで本節では、最も有効な波浪減勢効果が得られる斜面上リーフの底面条件について検討することにする。

ダブルリーフの波浪減勢効果を入射波高の透過率として捉えた場合に、巻き込みジェットの規模を示すジェットサイズ指標 S_j の増大と共に入射波高 H_1 に対する透過波高 H_T の比として定義された透過率 K_T の低下が見られ、特にジェットサイズ指標 S_j が 0.1 を上回る時、透過率 K_T が 0.3 を下回ることが明らかにされている（安田ら, 1995b）。

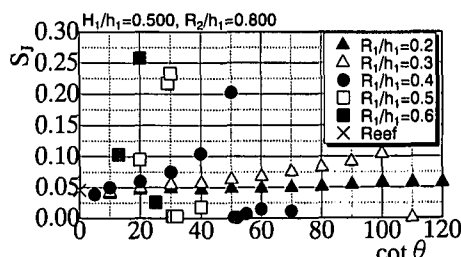
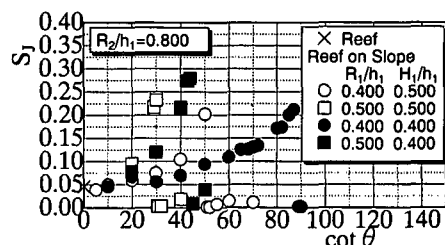
そこで以下では、 S_j と K_T の両者の関係よりジェットサイズ指標 S_j を波浪減勢効果を示す指標として捉え、これと斜面上リーフの底面条件との関係を検討する。

a) 斜面勾配とジェットサイズ

図-5 は、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5、リーフ相対天端高 R_2/h_1 が 0.8 の条件に対して、斜面勾配の指標として採用した $\cot \theta$ とジェットサイズ指標 S_j の関係をリーフ相対設置高別に示したものである。

この図から、同一リーフ相対設置高の条件下では、斜面勾配が緩勾配になるに従い S_j が、増大傾向を示しているが、この傾向は単に斜面勾配 $\cot \theta$ の増大に対して単調増加とはならず極大値を持っていることが分かる。

したがって、この条件の斜面上リーフによって相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 の入射波の透過率 K_T が 0.3 を下回る様な“ S_j が 0.1 以上の砕波”を発生させるためには、矩形リーフの設置を想定している斜面の勾配が 1/10~1/50 の範囲にあることが必要であることが分かる。逆に、リーフの設置を想定している斜面の斜面勾配が 1/60 以下となる緩勾配の場合において透過率 K_T が 0.3 を

図-5 斜面勾配とジェットサイズ指標 S_j の関係図-6 入射波高が異なる場合の斜面勾配とジェットサイズ指標 S_j の関係

下回る (S_j が 0.1 以上の) 様な砕波を生じさせるためには、斜面勾配が 1/100 程度でかつ、リーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.3 となる斜面上の水深の深い位置にリーフを設置する必要がある、これがこの緩勾配におけるほぼ唯一の設置条件になっていることが分かる。また、この唯一の条件にしても発生する砕波のジェットサイズ指標 S_j が 0.1 で頭打ちとなっていることから、この条件では斜面上リーフによって生じる複合型砕波の波浪減勢効果を期待することは困難であると言える。

b) 入射波高とジェットサイズ

前項では、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 の条件にて斜面勾配とジェットサイズ指標 S_j すなわち透過率 K_T の関係を検討した。そこでここでは、相対入射波高が異なる場合の両者の関係について検討する。

図-6 はリーフ相対天端高 R_2/h_1 が 0.8 の条件に対して、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.4, 0.5 と異なる場合の斜面勾配 $\cot \theta$ とジェットサイズ指標 S_j の関係を示したものである。ただし、図中の白塗りは相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 を、黒塗りは 0.4 のものを示し、○印がリーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.4 を、□印が 0.5 のものを表している。

この図より、同一リーフ設置高および同一斜面勾配においては、入射波高が大きいものの程砕波時の巻き込みジェットのサイズが大きくなっていることが分かる。

また、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.4 の場合には 0.5 の場合に比べて、入射波の透過率 K_T が 0.3 を下回る (ジェットサイズ指標 S_j が 0.1 を上回る) 様な砕波を生じさせ得

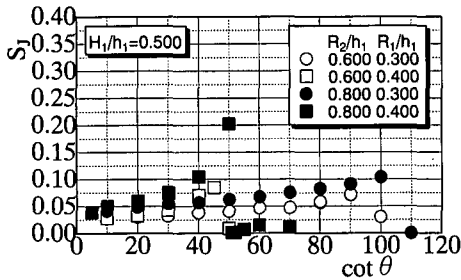


図-7 リーフ天端高がジェットサイズ指標 S_j に及ぼす影響

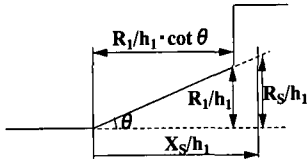


図-8 斜面の碎波点位置とリーフ設置位置の概略

る斜面勾配の範囲が広がっており、特に相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 の場合に波浪減勢効果を期待するのが困難であった緩斜面においてもその効果が期待できる斜面勾配の範囲が 1/80 程度まで広がっていることが分かる。

このことは、制御対象となる波高が前項に比べて低い H_1/h_1 が 0.4 の場合でも、リーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.4 の場合に、斜面勾配が 1/80 程度の緩勾配まで複合型碎波による波浪減勢効果が得られることを意味する。

c) リーフ天端高とジェットサイズ

前項までは、斜面上リーフのリーフ相対天端高 R_2/h_1 の値を 0.8 と固定して検討を行ってきた。そこでここでは、これが 0.8 より低い場合の、斜面上リーフの斜面勾配とジェットサイズ指標 S_j の関係および斜面に対するリーフ設置条件に及ぼす影響について検討する。

図-7 は、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 の条件において、リーフ相対天端高 R_2/h_1 がこれまで検討してきた 0.8 の場合とこれを 0.6 とした場合の斜面勾配とジェットサイズ指標 S_j の関係を示したものである。ここで、プロットの白抜きはリーフ相対天端高 R_2/h_1 が 0.6 のもの、黒塗りのは 0.8 のものを示しており、リーフ設置高が異なる場合の影響についても併せて比較検討するため、リーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.3 の場合を○印、0.4 の場合を□印で表してある。

この図よりリーフ相対天端高 R_2/h_1 が 0.6 の場合と 0.8 のものとの比較すると、全体的な傾向としてジェットサイズ指標 S_j が若干低下している程度であり、両者の間にあまり有意な差異が見られなかった。ただし、リーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.4 となる場合に示す指標 S_j の極大値はこれとは異なり大きな低下傾向を示している。

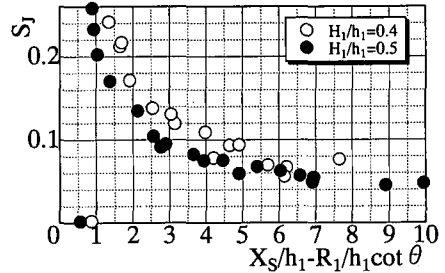


図-9 リーフ設置位置と斜面単独の碎波点位置の接近度とジェットサイズ指標 S_j の関係

表-1 リーフ相対設置高 R_1/h_1 とリーフ未設置の斜面の碎波点での斜面高 R_s/h_1 との比較

H_1/h_1	R_1/h_1	R_2/h_1	$\cot \theta$	S_j	R_s/h_1
0.400	0.500	0.800	40	0.2168	0.542
0.400	0.560	0.800	30	0.2415	0.605
0.500	0.400	0.800	50	0.2025	0.421
0.500	0.500	0.800	30	0.2329	0.531
0.500	0.500	0.800	20	0.2579	0.645

なおこの時、いずれのリーフ設置高の場合も入射波の透過率 K_T が 0.3 を下回る目安となる S_j が 0.1 の値に達しておらず、このことから、リーフ天端高はジェットサイズ指標 S_j の極大値に大きな影響を及ぼし、これが条件によっては斜面上リーフの波浪減勢効果の低下の原因となり得ることが分かる。

d) リーフ設置高とジェットサイズ

ここまで見てきた指標 S_j は、すべて斜面勾配の増大に対して単調増加とならず極大値を持っていた。

そこで、 S_j が極大値を持つ場合の共通の条件を探るため、この時のリーフ相対設置高 R_1/h_1 とリーフ未設置の場合の斜面による碎波点での斜面高 R_s/h_1 (図-8 参照) との比較を表-1 にて行った。その比較の結果、どのケースにおいても R_s/h_1 の値が R_1/h_1 の値より若干大きい値を示していることから、リーフの設置位置はリーフ未設置の場合の一樣斜面の碎波点より少し沖側とすると良いことが分かった。

そこでこのリーフ設置位置をより明確にするために、リーフ未設置の一樣斜面の斜面法先からの碎波点位置を X_s/h_1 で表すことにすると(図-8 参照)、図-9 では斜面法先からのリーフ設置位置 $R_2/h_1 \cdot \cot \theta$ とリーフ未設置の斜面の碎波点 X_s/h_1 との接近度を表す $X_s/h_1 - R_2/h_1 \cdot \cot \theta$ を横軸に、その場合のジェットサイズ指標 S_j を縦軸に取り、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.4 の場合を○印、0.5 の場合を●印で図中にプロットした。

なお、図中のプロットには様々な底面条件を含めているが、その分布を見ると、指標 S_j はリーフ設置位置と斜

面の碎波点との接近度 $X_s/h_1 - R_1/h_1 \cdot \cot \theta$ のみに従っていることが分かる。このことから、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.5 の場合は、リーフ相対設置位置 $R_1/h_1 \cdot \cot \theta$ を斜面の碎波点の沖側 0.8~2.5 の範囲に、また、相対入射波高 H_1/h_1 が 0.4 の場合には、この範囲が多少広く、斜面の碎波点の沖側 1.0~4.0 の範囲に設定すると斜面上リーフにより生じる碎波のジェットサイズ指標 S_f が 0.1 以上すなわち入射波の透過率 K_T が 0.3 を下回るようにリーフを設置できることが分かった。

4. 一様傾斜面上に設置したダブルリーフ

4.1 ジェット落下限界波形とジェットサイズ

図-10 は、下段リーフ相対天端高 R_1/h_1 が 0.6、上段リーフ相対天端高 R_2/h_1 が 0.8、相対リーフ間距離 X_1/h_1 が 1.0 となるダブルリーフおよびこのダブルリーフを斜面勾配 $\cot \theta$ が 40 となる一様傾斜面にリーフ相対設置高 R_1/h_1 が 0.4 となる位置で設置した場合のジェット落下限界波形を典型的な条件の比較として示したものである。尚、図中にはこの時のジェットサイズ指標 S_f も併せて表示してある。この両者の波形の比較より、ダブルリーフを斜面上に設置した方が大きな巻き込みジェットを発生させ得ることが分かる。また前章では斜面上リーフがダブルリーフと全く同様の碎波能を有していることを明らかにしたが、これと図-10 による結果を併せて考えると、斜面上リーフよりも斜面上ダブルリーフの方がより大きな巻き込みジェットを発生させ得ると推察できる。

そこで、これを確かめるために、図-11 にて斜面上リーフと斜面上ダブルリーフのジェット落下限界波形の比較を行った。ただし、両者の底面条件の内、斜面勾配およびリーフ設置位置は共通とし、斜面上リーフのリーフ天端高は前章の結果からより高い方が S_f が大きいとの結論を得ていることから、斜面上ダブルリーフの上段リーフ天端高と同じ値を採用することとした。また、斜面上ダブルリーフのリーフ間距離については最大の S_f が得られるものを選びこれにて比較を行うこととした。

そこで、その両者の結果を見てみると、事前の推察通り斜面上ダブルリーフの巻き込みジェットの規模が斜面上リーフのものより大きくなっていることが分かる。

4.2 斜面上へのダブルリーフの設置条件

斜面上ダブルリーフの設置条件を考えると、斜面上リーフと同様に斜面上リーフの碎波点位置と斜面上ダブルリーフの上段リーフ設置条件を表すリーフ間距離 X_1/h_1 の接近度が重要となる。そこで、斜面上リーフの斜面法先からの碎波点距離を X_n/h_1 で表すことにし、表-2 に斜面上ダブルリーフにおいて最大のジェットサイズと

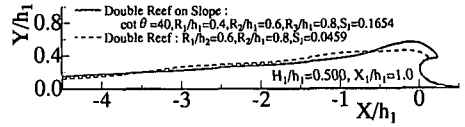


図-10 ダブルリーフと斜面上ダブルリーフのジェット落下限界波形の比較

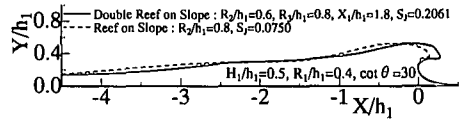


図-11 斜面上リーフと斜面上ダブルリーフのジェット落下限界波形の比較

表-2 S_f とリーフ間距離 X_1/h_1 の関係

H_1/h_1	R_1/h_1	R_2/h_1	R_3/h_1	$\cot \theta$	S_f	X_1/h_1	$X_1/h_1 - X_n/h_1$
0.500	0.400	0.600	0.800	10	0.1737	3.0	1.106
0.500	0.400	0.600	0.800	20	0.1504	2.0	1.510
0.500	0.400	0.600	0.800	30	0.2061	1.8	1.282

なる底面条件にて両者の接近度と S_f の関係を示した。その結果、0.2 に近い S_f が現れるためには、両者の接近度が 1.0 付近となる様にリーフ間距離を与える必要があることが分かった。

5. 結 論

本研究で明らかとなった項目を以下に列記する。

1. 一様傾斜面上に設置した矩形リーフの碎波特性について検討を行い、これがダブルリーフと同等の碎波（複合型碎波を含む）を生じさせ得ることを明らかにした。
2. この時のリーフ設置条件についてジェットサイズ指標 S_f を基に検討し、波浪減衰効果が期待できる入射波高および斜面勾配の範囲と有効なリーフ設置高の範囲を明らかにした。
3. 一様傾斜面上に設置したダブルリーフにより生じる碎波のジェットサイズは斜面上リーフやダブルリーフのものを上回ること、および、波浪制御が有効なリーフ間距離の範囲を示した。

参 考 文 献

- 安田孝志・原 正典・榊原幸雄 (1991): BIM を用いたステップによる孤立波の碎波を伴う変形とその法則, 土木学会論文 集, No. 429/II-15, pp. 74-83.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀 (1995a): 複合型碎波の発見とその発生条件, 海岸工学論文 集, 第 42 巻, pp. 51-55.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀・福本 正 (1995b): 複合型碎波の碎波後の波形変化と波高減衰特性, 海岸工学論文 集, 第 42 巻, pp. 61-65.