

段階的砕波変形モデルによる人工リーフの 波浪減殺特性の解析 (Ver.3)

NUMERICAL ANALYSIS OF WAVE DAMPING CHARACTERISTICS OF ARTIFICIAL REEFS BY GRADATIONAL WAVE BREAKING MODEL

合田良実
Yoshimi GODA

土木学会名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授 (株)エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
Honorary Member of JSCE, Dr.Eng., ECOH Corp.

A numerical analysis technique for calculation of wave transformation around artificial reefs is developed with the parabolic equation incorporating gradational breaker index, which was presented by the author in 2002. The technique has been applied for the field data of a long-stretched artificial reef at Himekawa and a single reef at Yugawara as well as the laboratory data by the Coastal Engineering Laboratory of the National Institute for Land and Infrastructure Management and the author's one. The calculation results have shown good agreement with field and laboratory data. Design diagrams for the transmission coefficient of artificial reefs inclusive of 3-D effects have been prepared with the new numerical technique. The effects of the opening and aspect ratios on the wave transmission coefficient of artificial reefs have been clarified through numerical calculations.

Key Words: random waves, transmission coefficient, wave attenuation, artificial reef, frictional coefficient, field measurement

1. まえがき

人工リーフは海岸保全の有力な施設として日本沿岸各地で建設されている。しかし、人工リーフによる波浪減殺効果については適切な計算手法が開発されておらず、波高伝達率の概略算定式が用いられているにすぎない。

著者は先に、任意地形における多方向不規則波の砕波変形を計算する手法を開発し、種々の地形条件についてその適用性を検証した¹⁾⁻³⁾。その中には、横型および縦型人工リーフの小型水理模型実験データも含まれている。この計算手法は任意形状の人工リーフに対しても適用可能ではないかと考え、これまでに発表されている現地データや、第49回海岸工学講演会で野口ほか⁴⁾が発表した国土技術政策総合研究所の水理実験データと比較してみた。なお、後者は同所海岸研究室よりご提供いただいたものであり、同研究室のご厚意に深く感謝する次第である。

本論文で用いる計算手法は、放物型方程式による波浪変形計算をレーリー分布の各波高レベルについて行い、その際に水深で規定される砕波限界を波高レベル毎に変える段階的砕波係数を導入するものである。パー型海浜のトラフ部分のように水深が増大

する箇所については、段階的砕波係数の定数値を修正して適用する。さらに、底面摩擦による波高減衰効果も考慮する。また、一方向不規則波のみならず、多方向不規則波についても比較的短い計算時間で解析することができる。

以下に紹介するように、新しい計算モデルは実験室内のデータのみならず、現地の観測結果とも良く適合している。そこで、本モデルを用いて各種形状の人工リーフによる波浪減衰を計算し、人工リーフの波浪減殺特性についてとりまとめた。

なお、本資料は本年3月に第1版を作成したが、そのときに使用したトラフ部分の波浪減衰ならびに底面摩擦による波高減衰の推定に導入した経験式は、いずれも理論的根拠が薄弱であった。このため5月の第2版ではこれらを修正し、計算をやり直した。今回の10月の第3版は、横型・縦型リーフの比較その他を追加したものである。

2. 計算モデル

(1) 放物型方程式

本論文では、著者が縦型人工リーフの研究⁵⁾でこれまで使用してきた、平口・丸山^{6),7)}による式(1)の

放物型方程式を使用する。この方程式は、斜め入射波による屈折効果を的確に解析することができる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left\{ i \left(k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial x} (k_x c c_g) \right\} \phi \quad (1)$$

$$+ \frac{i}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - f_D \phi$$

ここに、 ϕ は速度ポテンシャルの複素振幅、 k_x, k_y は x, y 方向の波数、 c は波速、 c_g は群速度、 i は虚数単位である。また、 f_D は次項に述べる波浪の減衰を表す関数である。

(2) 減衰項の取り扱い

式(1)の放物型方程式では、波高の減少が速度ポテンシャルに比例する形で生じるとして扱う。減衰メカニズムとして砕波および底面の乱流境界層内のせん断力による摩擦損失がある。そこで減衰係数 f_D を次のように表す。

$$f_D = f_{Db} + f_{Df} \quad (2)$$

ここに、 f_{Db} は砕波に起因する減衰係数、 f_{Df} は底面摩擦損失による減衰係数である。

これらの減衰係数の算定式の詳細については、文献^{2), 3)}を参照していただきたい。なお、砕波減衰係数は計算地点の波振幅と水深の比率がある値を超えたときにのみ機能するもので、限界となる振幅水深比(砕波係数)は波群中の波高レベルによって異なる値を与えている。

底面摩擦による波高減衰は、基本的に振幅の2乗に比例する。このため、速度ポテンシャルに比例する形の減衰を表す係数としては、次のように表される。

$$f_{Df} = \frac{4}{3\pi} f_w \frac{a}{h^2} \frac{k^2 h^2}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} \quad (3)$$

ここに、 f_w は底面の摩擦係数、 a は波振幅、 h は水深、 k は波数である。摩擦係数の値としては、沖合の砂質海浜では $f_w = 0.01$ 程度の値がしばしば使われる。人工リーフについては、後述する現地観測例から判断すると $f_w = 0.15$ 程度ではないかと思われる。ただし、今後さらに検討する必要がある。

その他の計算手法の詳細については文献^{2), 3)}を参照していただきたい。

3. 横浜国立大学における人工リーフ実験との比較

(1) 縦型人工リーフ周辺の波高変化

著者は先に縦型人工リーフの概念を提唱し、水理模型実験を行った結果と放物型方程式による計算結果を比較した⁵⁾。縦型人工リーフは沿岸方向の堤長0.10m、岸沖方向の天端幅1.50m($x = 3.0 \sim 4.5$ m)、天端水深0.03mの寸法であり、勾配1/20の一樣斜面上の水深0.15~0.10mの個所に3基を中心間隔1.0

mで設置した。前後の斜面と横の斜面の取り合い部分は図示のように半円形で製作した。人工リーフの配置を図-1の通りであり、3基の中心軸はそれぞれ $y = 2.0, 3.0$, および4.0mの位置にある。

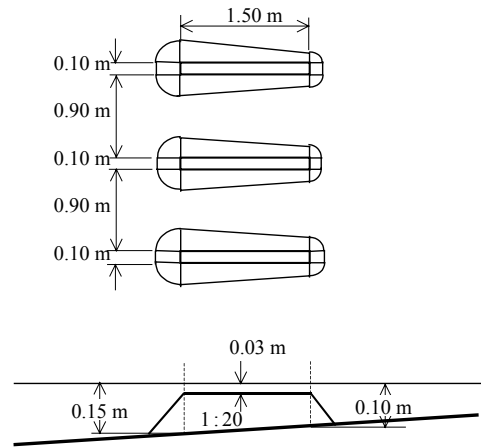


図-1 縦型人工リーフの配置状況

この模型に対し、以下のような波高・周期を持つ2種類の単一方向不規則波(修正 Bretschneider-光易型スペクトル)を一樣水深0.30mの地点から斜め入射角 15° (左下から右上へ進行)で1/20勾配斜面に作用させた。

不規則波 A : $(H_{1/3})_f = 0.075$ m, $T_{1/3} = 1.2$ s

不規則波 B : $(H_{1/3})_f = 0.055$ m, $T_{1/3} = 1.6$ s

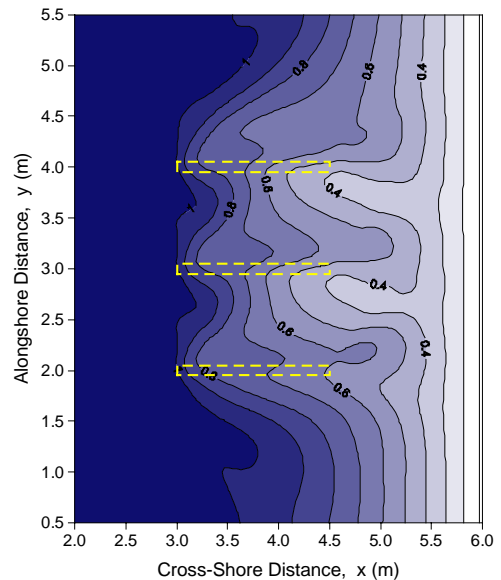


図-2 縦型人工リーフへ不規則波Aが作用した時の等波高比線図

図-2に不規則波Aが作用したときの等波高比線の分布(波高比は0.3から0.2ごと)を示す。計算は格子間隔 $x = y = 0.05$ mで、波高成分 $M = 61$ 、周波数成分 $2N = 20$ で行った。人工リーフの前面では波高比が1.0であり、リーフ背後では波高比が0.4以下

にまで低下している。中央の縦型リーフの天端面は、 $x=3.0\sim 4.5\text{m}$ 、 $y=3.0\text{m}$ の箇所にあり、天端面で波高がやや大きく、その両側で波高の谷が現れている。ただし、波がやや斜め下から入射しているため、波高等深線の尾根はやや右上に傾いている。

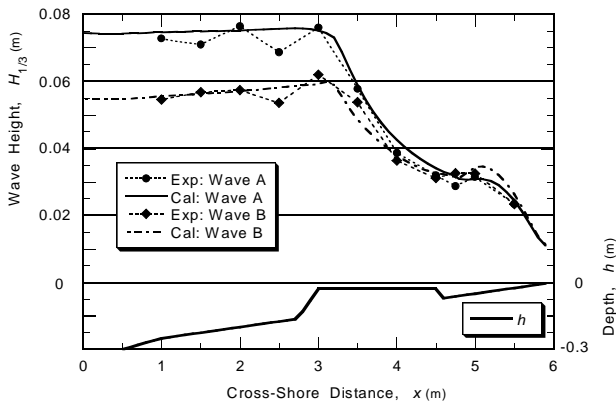


図 - 3 縦型人工リーフの岸沖方向の波高分布 (1番目と2番目の中間軸沿い: $y=2.5\text{m}$)

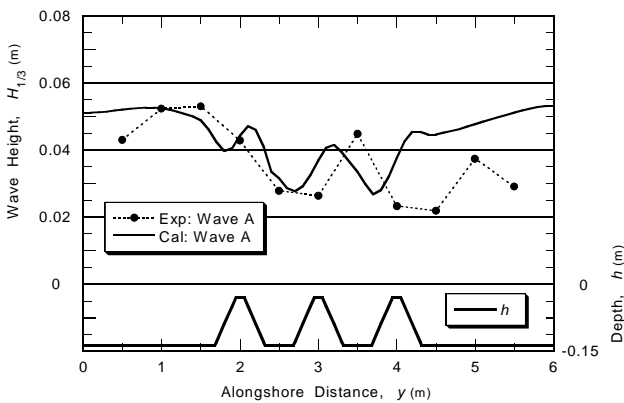


図 - 4 不規則波Aに対する縦型人工リーフ沿岸方向の波高分布 ($x=4.75\text{m}$ 、水深 6.25cm)

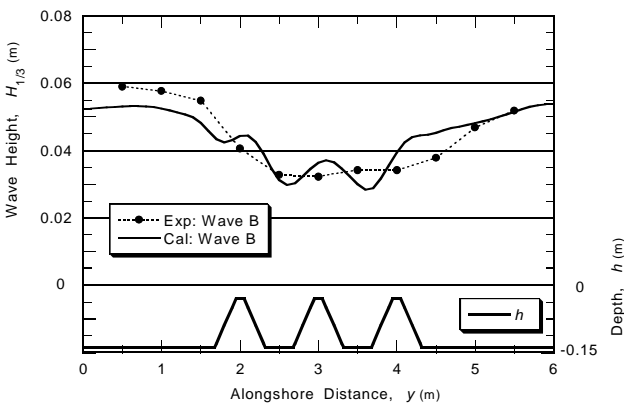


図 - 5 不規則波Bに対する縦型人工リーフ沿岸方向の波高分布 ($x=4.75\text{m}$ 、水深 6.25cm)

図 - 3~5 は縦型人工リーフ周辺の有義波高について計算結果と実験結果を比較したものである。なお、実験データは文献⁸⁾に記載の図から読みとった。

図 - 3 は、1番目と2番目の人工リーフの中間軸 $y=2.5\text{m}$ に沿った岸沖方向の波高分布であり、不規則波 A、B の両者を併示している。ここに示した水深図は波高測定線 ($y=2.5\text{m}$) ではなく、リーフ軸線上のものである。この比較結果では、計算値が実験値とかなり良く合っており、 $x=4.5\text{m}$ 付近より岸側で入射波高の小さな不規則波 B のほうが大きな波高を示す傾向も再現されている。

次に、図 - 4、5 は人工リーフの頂部後端から 0.25m 岸側の地点 ($x=4.75\text{m}$) の場所での沿岸方向の波高分布を示す。水深図は波高測定位置ではなく、リーフ先端付近の設置水深 0.1375m ($x=3.25\text{m}$) の箇所であり、人工リーフの設置状況を例示するためのものである。

図 - 4 では $y > 4\text{m}$ の範囲の実験値が小さく、計算値と食い違う。これは実験水槽の斜め入射波に対する導波板設置の影響など、実験に特有のものではないかと思われる。一方、図 - 5 では計算値に局所的な変動が見られるもの、波高分布の全体的傾向はほぼ一致している。図 - 3~5 の結果は、若干の差異はあるものの、全体として今回の数値モデルで縦型人工リーフ周辺の波高分布をほぼ再現できることを示している。

(2) 横型人工リーフ周辺の波高変化

ここでは通常的人工リーフが沿岸方向に長く伸びるところから横型と名付けている。実験を行ったのは、沿岸方向の堤長が 1.00m 、岸沖方向の天端幅が 0.45m ($x=3.5\sim 3.95\text{m}$)、天端水深が 0.03m のものを中間隔 1.8m で図 - 6 のように2基設置したケースである⁸⁾。波は縦型人工リーフと同じく、不規則波 A と B を 15° の方向から斜め入射させている。

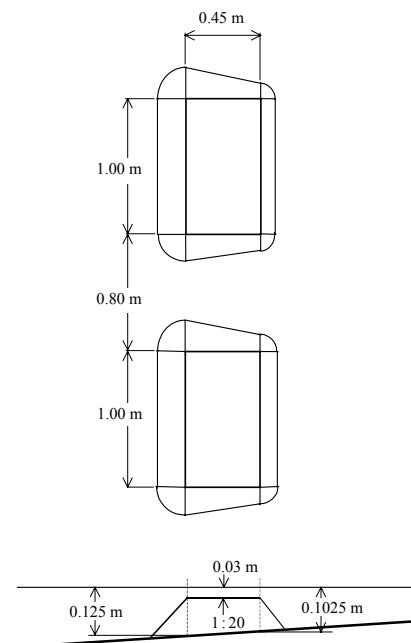


図 - 6 横型人工リーフの配置状況

この横型人工リーフへ不規則波Aを作用させたときの計算結果を等波高比線図の形で図-7に示す。波は屈折によってリーフ天端中心上に集まり、砕波によって減衰し、リーフ直背後で最小値0.25の波高比となる。しかし計算結果では、開口部から回り込んだ波の重畳によって、波高比が0.7に達する個所が現れる。また、波がリーフの背後へ集中する結果として、開口部の背後では波高が小さくなっている。

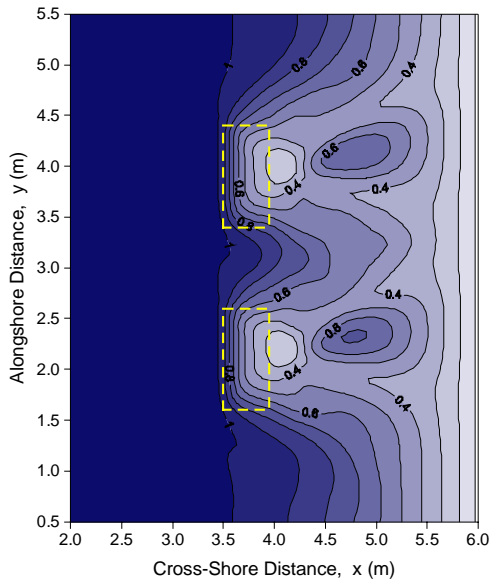


図-7 横型人工リーフへ不規則波A作用時の等波高比線図

有義波高の実験結果と計算値の比較のうち、岸沖方向の波高縦断分布を図-9~12、沿岸方向の分布を図-13~16に示す。前者の水深図は人工リーフを横断する場所のものであり、後者は水深0.125m ($x=3.5$ m)の場所のものである。いずれも人工リーフの設置状況を例示するためのものである。

不規則波Aに対する縦断方向の波高分布を図-9, 10に示す。図-9はリーフ中間の波高分布であり、図-10はリーフの中央軸縦断面に沿った波高分布である。不規則波Bに対する縦断方向の波高分布は図-11, 12に示すとおりである。不規則波Aではリーフ中間の岸側で計算波高の減衰が大きい。不規則波Bでもその傾向がやや見られる。リーフの中央軸縦断面では、リーフの天端後端での波高の減少とリーフ背後での波高増大が計算では実験よりも顕著に表現されている。

沿岸方向の波高分布は図-13~16に示すとおりであり、不規則波Aに対するものが図-13, 14、不規則波Bに対するものが図-15, 16である。沿岸方向の波高横断分布のうち、 $x=4.0$ mは人工リーフの裏法面にかかった位置であり、 $x=4.5$ mは天端の後端から0.55 m離れた位置にある。前者の図-12, 14では、リーフの背後で計算波高が実験値よりも小さく、計算では砕波減衰がやや大きめに評価されている。図-15の不規則波Bの場合には、開口部の背後で計

算波高が実験値よりもやや小さめである。一方、リーフ後端から離れた $x=5.5$ mの沿岸方向の断面では、リーフの背後の計算波高が実験値よりも大きく、開口部の背後では計算値が実験値よりも小さい傾向が見られる。

リーフの天端上で波高減衰が大きめに計算され、その背後で波高がやや増大するのは、図-7の等波高比線分布に見られるように、数値モデルがリーフの平面形状による波の屈折効果を過大に表現するためと考えられる。実現現象としては、人工リーフ側面の急傾斜面によって波が部分的に反射され、開口部を通過して岸側へ向かう。このためリーフ天端上へは、水深差による屈折効果から予測されるよりも少ない波エネルギーしか伝播しない。

放物型方程式は鉛直方向に積分した諸量についての運動方程式に基づいており、底面境界条件は鉛直速度成分がゼロとなることである。しかし、リーフ側面のように傾斜した底面境界ではその法線方向の速度成分がゼロであって、鉛直速度成分は有意な値を保持する(図-8参照)。この底面境界条件が適切に設定できないために実現現象との乖離が生じ、結果として反射波を無視し、リーフによる波の屈折効果を過大に表現すると考えられる。

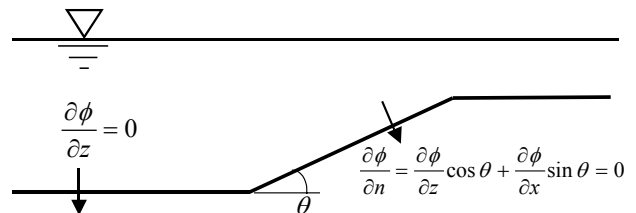


図-8 水平および傾斜海底面に対する境界条件

上述のように、本数値モデルにおいて人工リーフによる屈折効果が過大に表現されることを考慮するならば、縦型および横型人工リーフの波浪減殺効果を検討する際には、特定の地点の波高ではなく、リーフ背後の所定の範囲における平均波高で評価するのが適切と思われる。そこで測定値が得られている沿岸方向の波高について、実験および計算による平均波高を比較した。

縦型リーフでは、図-4, 5の $x=4.75$ mの断面について $y=1.5 \sim 4.5$ mの範囲、横型リーフでは図-12~15の $x=4.0$ mと 4.5 mについて $y=1.0 \sim 5.0$ mの範囲で平均波高を求めた。この実験および数値計算による平均波高を比較したのが図-17である。数値計算による平均波高は実験値の $\pm 20\%$ の範囲に入っており、今回の計算モデルが人工リーフによる波高低減効果をほぼ適切に評価できることを示している。

なお、縦型人工リーフと横型人工リーフを比べると、波浪条件が同じであっても、縦型リーフの平均波高の方が小さく、波高低減効果が大きい。ただし、計算値では両者の差があまり顕著でない。なお、6(3), (4)節で述べるように、人工リーフの平均波高伝達率は開口幅と堤長との比(開口比) S/A が大

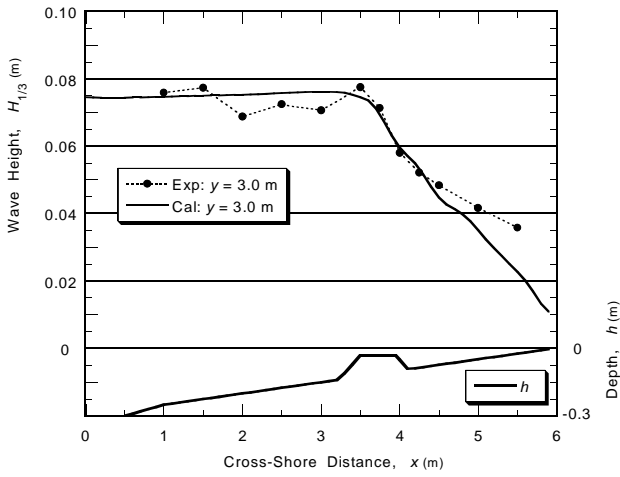


図 - 9 不規則波Aに対する横型人工リーフの岸沖方向の波高分布 (リーフ 2 基の中間軸上)

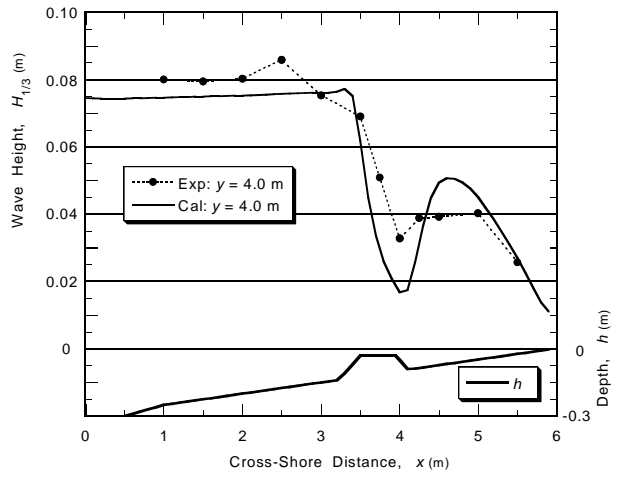


図 - 10 不規則波Aに対する横型人工リーフの岸沖方向の波高分布 (第 2 番目のリーフの天端中心縦断方向)

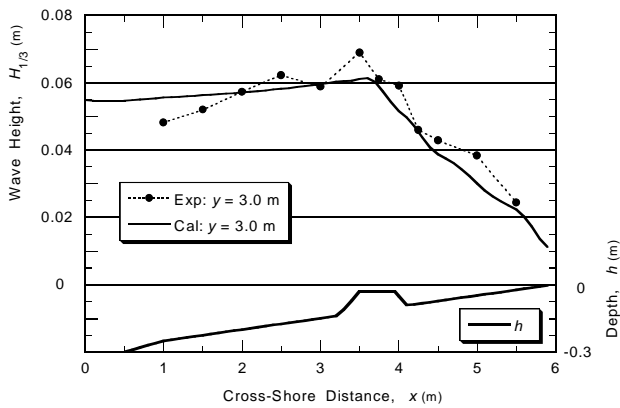


図 - 11 不規則波Bに対する横型人工リーフの岸沖方向の波高分布 (リーフ 2 基の中間軸上)

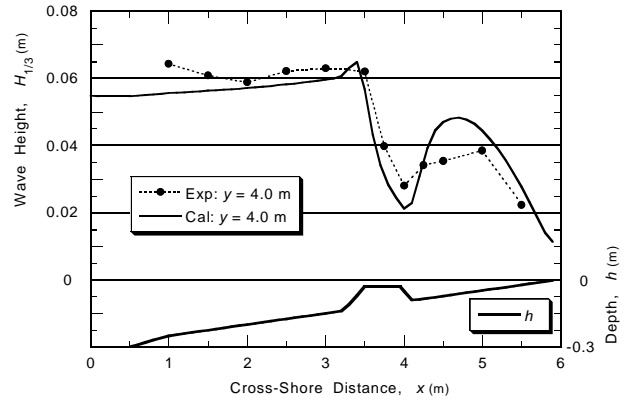


図 - 12 不規則波Bに対する横型人工リーフの岸沖方向の波高分布 (第 2 番目のリーフの天端横断方向)

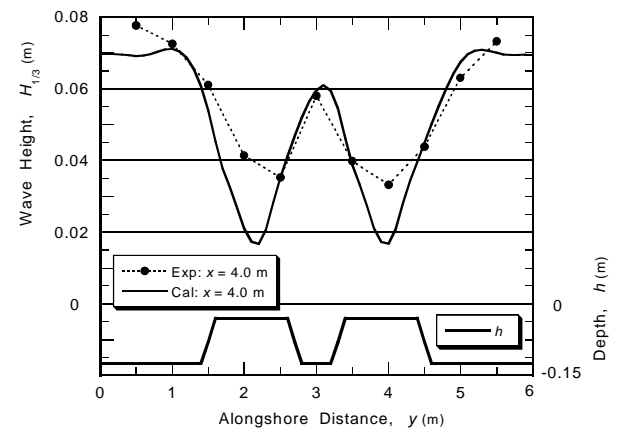


図 - 13 不規則波Aに対する横型人工リーフの沿岸方向の波高分布 (x = 4.0 m, 水深 10.0 cm)

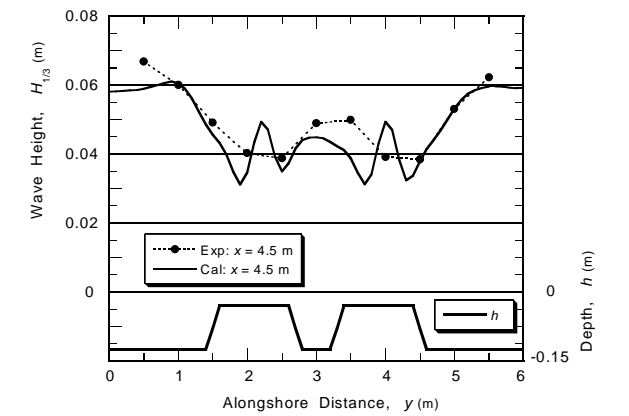


図 - 14 不規則波Aに対する横型人工リーフの沿岸方向の波高分布 (x = 4.5 m, 水深 7.5 cm)

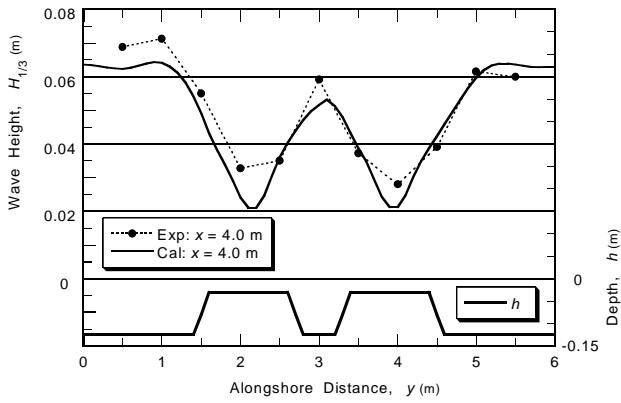


図 - 15 不規則波Bに対する横型人工リーフの沿岸方向の波高分布 ($x = 4.0\text{ m}$, 水深 10.0 cm)

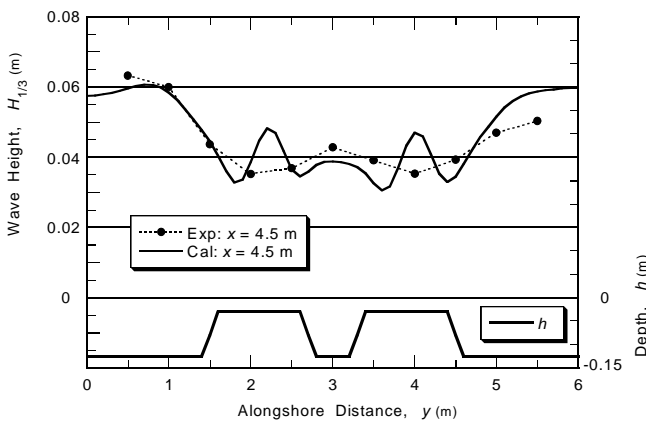


図 - 16 不規則波Bに対する横型人工リーフの沿岸方向の波高分布 ($x = 4.5\text{ m}$, 水深 7.5 cm)

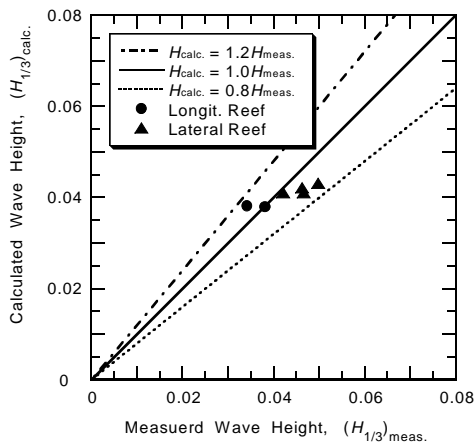


図 - 17 人工リーフ背後における沿岸方向の平均波高の計算値と実験値の比較

きくなると増大し、天端幅と堤長の比（縦横比） B/A が大きくなると減少する。縦型人工リーフは、横法面の中間で測った有効堤長が $A' = 0.415\text{ m}$ 、有効開口幅 $S' = 0.585\text{ m}$ 、天端幅 $B = 1.00\text{ m}$ であり、したがって $S'/A' = 1.41$ 、 $B/A' = 2.41$ である。一方、横型人工リーフは $A' = 1.284\text{ m}$ 、 $S' = 0.516\text{ m}$ 、 $B = 0.45\text{ m}$ であり、

開口比と縦横比は $S'/A' = 0.40$ 、 $B/A' = 0.35$ である。開口比と縦横比が異なるために単純な比較が難しいが、縦型リーフが不利な条件であったと考えられる。

4. 国土技術政策総合研究所における実験データとの比較

(1) 人工リーフの模型と実験条件

国土技術政策総合研究所海岸研究室では、幅 24 m 、奥行き 20 m の平面水槽内に3基の人工リーフを設置して不規則波を作用させ、波高、流速、流況等を測定した⁴⁾。模型人工リーフのうち、今回解析した実験ケースの模型の諸元を表 - 1 に示す。また、模型の配置は図 - 18 の通りである。

表 - 1 模型人工リーフの諸元

模型 No.	天端幅 $B(\text{m})$	堤長 $A(\text{m})$	開口幅 $S(\text{m})$	開口比 S/A
3	1.00	4.00	1.20	0.30
4	1.00	2.00	1.20	0.60
7	1.00	3.00	1.80	0.60
8	1.00	3.00	1.20	0.40

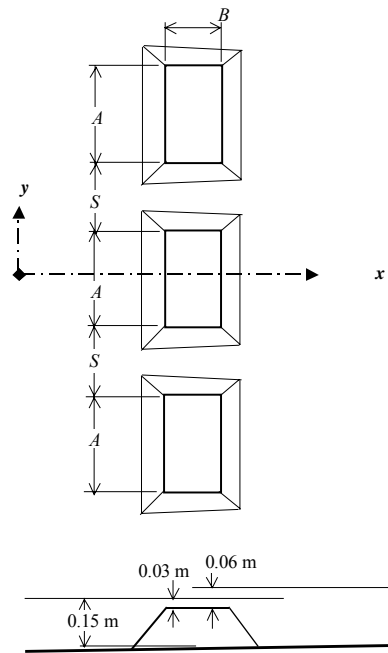


図 - 18 国土技術政策総合研究所の模型人工リーフの配置

ここでは、その内の模型 No. 8 に対する計算結果をまず紹介する。人工リーフは天端幅 1.00 m 、堤長 3.00 m のもの3基を開口幅 1.20 m で水深約 0.15 m (中央部分) の個所に設置してある。天端水深は 0.03 m であり、水位をさらに 0.03 m 上げて天端水深を 0.06 m としたケースも実験している。人工リーフは木製

で内部に重錘を入れて固定した。法面勾配は前・後面および側面ともに1:3である。波はすべて人工リーフに垂直に入射している。

図-19は天端水深が $h_t=0.03\text{m}$ 、入射波高が $H_{1/3}=0.19\text{m}$ であってリーフ上で激しく波が砕けたと想定されるケースについて、計算結果を等波高比線図として示したものである。周期は $T_{1/3}=2.03\text{s}$ である。実験のリーフが木製であるところから、摩擦係数は水槽底面と同じ $f_w=0.01$ とした。計算は格子間隔 $x=y=0.10\text{m}$ で、波高成分 $M=61$ 、周波数成分 $2N=20$ で行った。

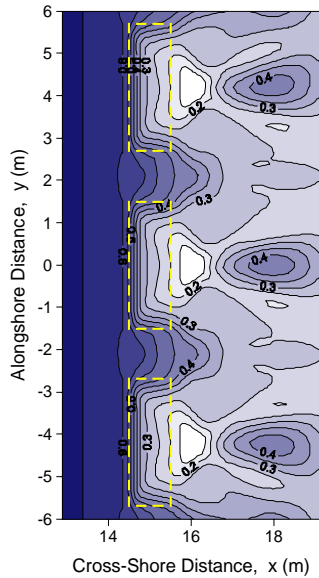


図-19 砕波が激しいケースの等波高比線図
($H_{1/3}=0.19\text{m}$ 、天端水深 0.03m)

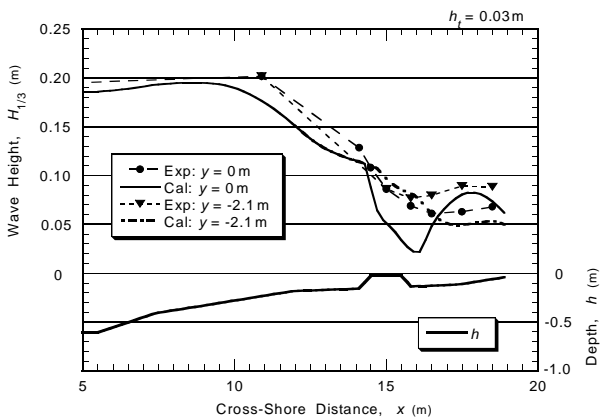


図-20 砕波が激しいケースにおける岸沖方向の波高分布 ($H_{1/3}=0.19\text{m}$ 、天端水深 0.03m)

堤前水深の 0.15m に比べて入射波高が大きいため、リーフ前面で波高比が 0.6 以下になっていることが分かる。また、人工リーフの背後のやや離れた箇所には波の集中が見られ、逆に開口部の背後では波高が小さく、波高比が 0.25 程度にまでなっている。

この波浪に対する実験結果と計算値を比較したのが図-20である。図中には中央の人工リーフの中心

軸を通る測線 ($y=0.0\text{m}$) および開口部の中央を通る軸線 ($y=-2.1\text{m}$) の計算波高および実験波高を示している。中心軸線の縦断波高がリーフ天端上で計算値が実験値よりも小さいのに対し、リーフ背後では計算値が大きくなっている。また、開口部についてはリーフ設置範囲と同水深の箇所では計算波高が実験値とはほぼ同じである。しかし、岸に近づくにつれて計算波高が減少し、実験値との乖離が大きくなる。

次に、天端水深が $h_t=0.06\text{m}$ 、入射波高が $H_{1/3}=0.051\text{m}$ であって、リーフ前面では砕波減衰が始まっていないケースについて、計算による波高比の分布を図-21に示す。波の周期は $T_{1/3}=0.89\text{s}$ である。

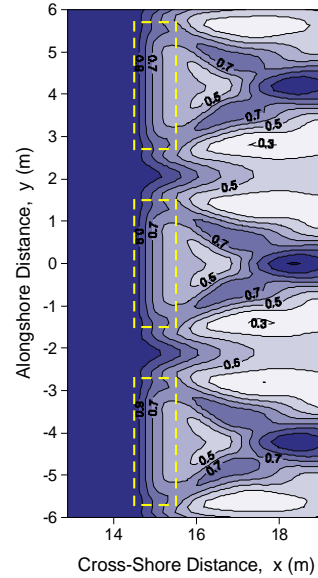


図-21 砕波が弱いケースの等波高比線図
($H_{1/3}=0.051\text{m}$ 、天端水深 0.06m)

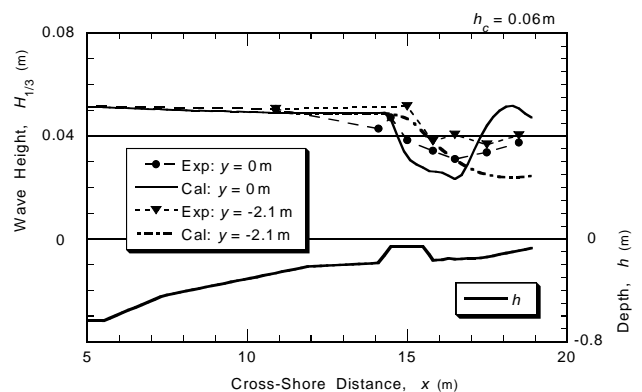


図-22 砕波が弱いケースにおける岸沖方向の波高分布 ($H_{1/3}=0.051\text{m}$ 、天端水深 0.06m)

リーフの天端上で波高比が 0.5 以下となり、天端背後で 0.45 近くになるものの、そのさらに背後では波高比が 1.0 を超える箇所が現れる。一方、開口部の背後では波高減少が著しく、波高比が 0.5 以下となる箇所がある。

このケースについて、図-20と同様に中央の人工

リーフの中心軸を通る測線 ($y = 0.0\text{m}$) および開口部の中央を通る軸線 ($y = -2.1\text{m}$) の計算波高および実験波高を比較したのが図 - 22 である。

数値計算結果がこのように実験値と異なる傾向を示すのは、リーフの平面形状による屈折効果が過大に表現されるためと考えられる。前節の横浜国立大学における実験よりも計算と実験との差異が顕著に現れたのは、実験波の周期がほぼ同じであるのに対し、リーフの堤長が3.0倍と大きいため、波長に対してリーフが相対的に大きくなり、屈折効果が強く現れたためであろう。なお、今回の計算では屈折効果を抑えるために横法面の勾配を1:0.5と急にしており、模型の形状である1:3を用いると開口部に面する岸側領域の波高がさらに小さく計算された。

なお、実験ではリーフの頂面における波高がかなり大きい。図 - 20 のケースでは、天端水深が0.03mに対してリーフ中央で $H_{1/3} = 0.086\text{m}$ 、リーフ頂部の後端で0.069mとなっている。最高波高 H_{max} のデータはさらに大きなものであろう。また、リーフ前方の水深0.237mの地点でも $H_{1/3} = 0.202\text{m}$ を記録している。この実験では長周期波が顕著に発達し、またリーフ背後の水位上昇がかなり大きかったと報告されている。こうした長周期波の発達や水位上昇が砕波の波高を増大させたとも考えられる。

数値計算においてリーフによる屈折効果が顕著に出現するのは、前述のように、本数値モデルが人工リーフの側法面からの波の反射を考慮していないことによると考えられる。

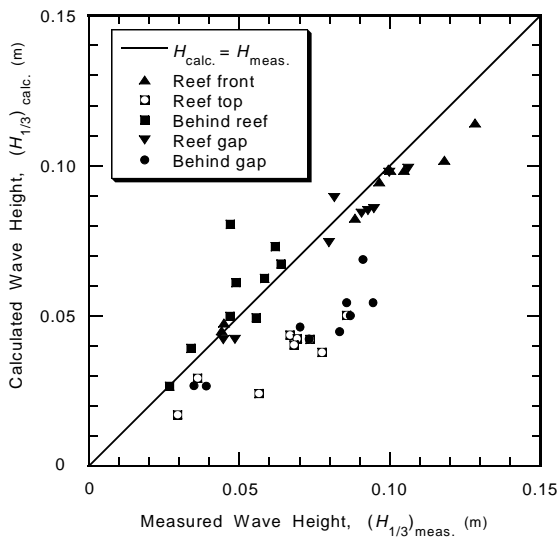


図 - 23 区域平均波高の実験値と計算値の比較

国土技術政策総合研究所からは上記の2ケースのほかにさらに7ケースのデータを提示していただいている。そこで、リーフ中央軸線の法先および法尻の2点で測定された波高の平均値をReef front、リーフ天端中心および法尻の2点の平均波高をReef top、リーフ中心軸延長線上の背後の3点の平均波高をBehind reef、リーフ開口部中心線の2点の平均波高

をReef gap、開口部中心延長上の背後の3点の平均波高をBehind gapと名付けて実験値と計算値を算出した。この結果を図 - 23 に示す。なお計算値は、実験における波高計設置地点に対応する格子点を対象として求めた平均波高である。

まず、リーフ法先 (Reef front) の波高および開口部 (Reef gap) は計算値が実験値とほぼ一致しており、一様勾配斜面における波高変化を適切に算定している。 $(H_{1/3})_{\text{meas.}} = 0.12 \sim 0.13\text{m}$ の範囲のデータで計算値が小さいのは、実験において法尻の波高が水位上昇などのために砕波による波高減衰が十分に発現しなかったためと考えられる。一方、リーフ天端上 (Reef top) では計算値が実験値よりも小さい。これは、実験において長周期波や水位上昇によって砕波波高が増大したためと考えられる。

リーフの背後 (Behind reef) では全般に計算波高が実験値よりも大きい。その一方で、開口部の背後 (Behind gap) では計算値が過小である。この二つの現象は、先に述べたように本計算モデルでは波の屈折効果を過大に表現することによる。

人工リーフに対する数値計算モデルの適用性を検討するため、リーフ背後の代表値としてBehind reefとBehind gapの二つの平均波高を算出して実験値と計算値を比較した。この結果を図 - 24 に示す。このうち6データの模型リーフは横幅3.0m、開口幅1.2m ($S/A = 0.4$) であるけれども、他の3データの模型リーフは横幅と開口幅がそれぞれ3.0mと1.8m ($S/A = 0.6$)、2.0mと1.2m ($S/A = 0.6$)、4.0mと1.2m ($S/A = 0.3$) と異なっている。

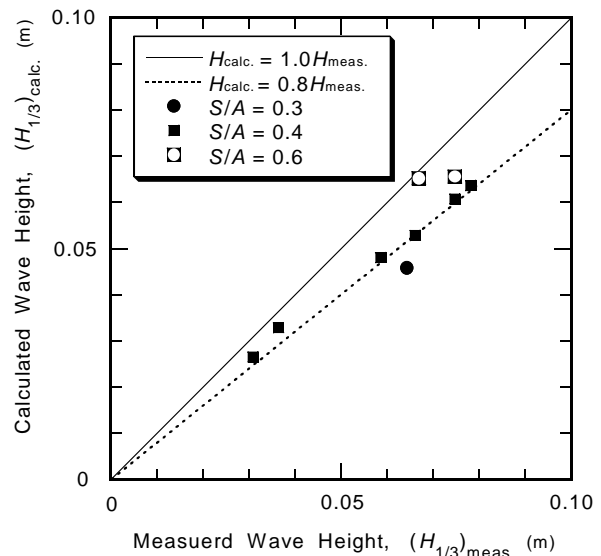


図 - 24 人工リーフの背後領域における平均波高の計算値と実験値の比較

このリーフ背後の波高の平均値で見ると、数値計算の結果は実験値の0.73 ~ 0.98倍の範囲に入っており、数値モデルが波高低減効果をやや過大に評価する傾向にあるけれども、人工リーフの概略設計のための資料としては十分に利用可能と考えられよう。

5. 現地の人工リーフとの比較

(1) 系魚川海岸

系魚川海岸では1986～1989年に総延長1330mの人工リーフが水深8.6～9.6mの箇所に建設され、このリーフ周辺の状況を宇多ほか⁹⁾が報告している。人工リーフは延長930mと400mの2基の連続堤であり、天端幅が $B = 40\text{m}$ であって、天端が $\text{TP} - 4.04\text{m}$ と低いことが特徴である。2基の連続人工リーフはいずれも前面と背後で波高観測を行っており、宇多ほか⁹⁾は両者の関係を表す図表を提示している。観測結果はばらつきが大きいので、データの上限と下限と見なされる範囲を図-25に示す。

この人工リーフを2次元形状のリーフと見なし、入射波として $H_0' = 0.5 \sim 4.5\text{m}$ 、 $T_p = 3.0 \sim 13.5\text{s}$ を与えて本モデルで計算した結果も図中に示した。潮位は $\text{LWL} = \text{TP} \pm 0.0\text{m}$ および $\text{HWL} = \text{TP} + 0.46\text{m}$ の2種類である。周期は波高が大きなものほど長く設定した。

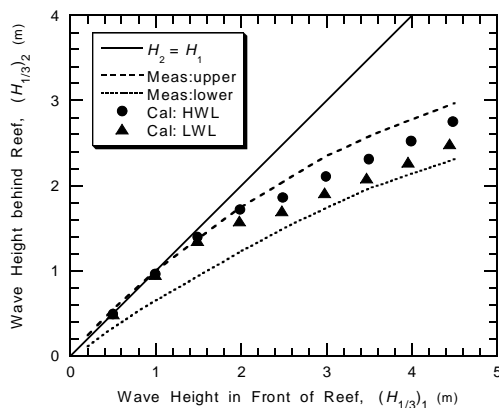


図-25 系魚川海岸人工リーフの沖側波高 $(H_{1/3})_1$ と岸側波高 $(H_{1/3})_2$ の相関関係

周波数スペクトルはBretschneider-光易型とし、方向分散は $S_{\max} = 25$ を与え、スペクトル成分30個の合成で計算を行った。格子間隔は $x = y = 2.0\text{m}$ で、波高成分は $M = 61$ である。

計算に当たっては、人工リーフ表面の摩擦係数を $f_w = 0.1, 0.2, 0.3$ の3段階で変化させてみた。その結果、波高3.0m以上の領域で $f_w = 0.1$ と0.2の中間値が現地観測値に適合するようであったため、摩擦係数として $f_w = 0.15$ を採用した。図-25にはこの計算結果を示している。

系魚川海岸の人工リーフは天端水深が小さいため、入射波高4.5mでも天端水深 h_t と入射波高 $H_{1/3}$ との比が1.0前後の大きな値である。こうした条件では、リーフ天端での碎波によって波高が減衰するだけではなく、底面摩擦によるエネルギー減衰が同等以上に貢献する。波高が小さいときには、摩擦減衰係数 f_{Df} に対する式(4)で示されるように、振幅水深比 a/h が小さいため、摩擦減衰効果があまり発揮されないのである。

(2) 湯河原海岸

湯河原海岸では、1990年頃に埋立護岸の前面約100mの地点(水深約9m)に、天端幅 $B = 32\text{m}$ 、堤長 $A = 170\text{m}$ の人工リーフを建設し、1992年1月までにこれを拡張して天端幅 $B = 70\text{m}$ とした。天端高は $\text{TP} - 1.84\text{m}$ である。この人工リーフ周辺の波浪については大中・吉沢¹⁰⁾が報告している。波高計は天端先端から沖側へ約50mおよび天端先端から岸側へ約90mの2地点に設置された。

大中・吉沢は、埋立護岸からの反射波の影響が大きいとして、反射波を除去した波高を推定し、人工リーフ背後と前面の波高比 H_T/H_I と相対天端水深 h_t/H_0' の関係を提示している。そこで、現地データの上限・下限と見なされる曲線を描き、これを再現したのが図-27, 28中の破線である。前者は天端幅が $B = 32\text{m}$ のケース、後者は天端幅が $B = 70\text{m}$ の結果である。天端幅が広げられた結果として、波高比が0.1程度低下している。

この人工リーフ元地形に対し、入射波として $H_0' = 0.625 \sim 3.0\text{m}$ 、 $T_p = 7.0 \sim 12.0\text{s}$ を与えて本モデルで計算した結果も図中に示した。方向スペクトル、計算格子間隔等の与え方は系魚川海岸と同じである。潮位は、 $\text{LWL} = \text{TP} - 0.84\text{m}$ 、 $\text{MWL} = \text{TP} \pm 0.0\text{m}$ 、および $\text{HWL} = \text{TP} + 0.64\text{m}$ の3種類である。リーフ背後の波高計算値としては、本数値モデルが屈折効果の過大表現によって波高の場所的変動が大きくなる点を考慮し、リーフ背後の波高計設置地点を囲む岸沖方向40m、沿岸方向60mの長方形の範囲のエネルギー平均の有義波高(自乗平均平方根値)を用いた。

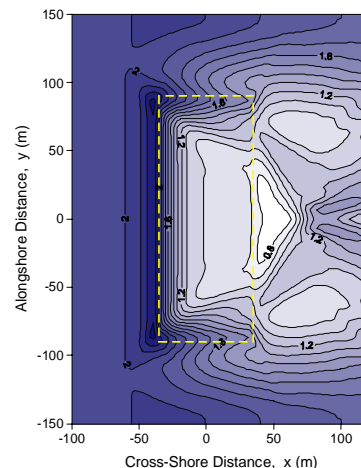


図-26 湯河原海岸人工リーフ周辺の波高分布 $(H_{1/3} = 2.0\text{m}, T_p = 9.0\text{s})$

図-26は天端幅70m、潮位 $\text{TP} \pm 0.0\text{m}$ の状態では $H_{1/3} = 2.0\text{m}$ 、 $T_p = 9.0\text{s}$ の波が直角に入射したときのリーフ周辺の有義波高の分布を計算した結果である。破線で示す矩形部分はリーフの天端面である。3で述べたリーフ側面で波の屈折が強調され、このために天端上で波高の減衰が著しく、リーフ背後で逆に波高が高まる現象がこの場合にも認められる。この

波高増大はリーフの両側面で屈折した波が背後へ回り込み、背面で重なり合った結果ではないかと考えられる。

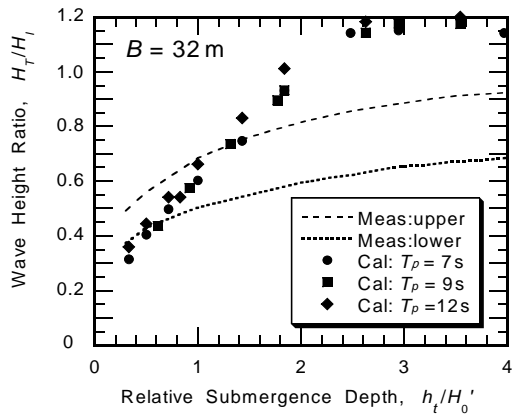


図 - 27 湯河原海岸人工リーフの背後と前面の波高比 (天端幅 32m のケース)

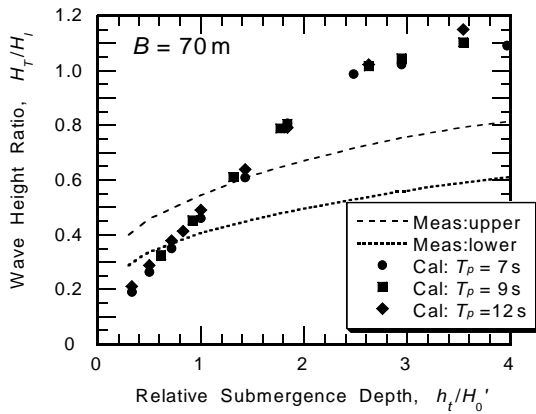


図 - 28 湯河原海岸人工リーフの背後と前面の波高比 (天端幅 70m のケース)

波高伝達率の計算では、前述のように $40 \times 60\text{m}$ 四方の区域の平均有義波高を伝達波高とした。計算結果によると、波高が小さくて相対天端水深 h_t/H_0' が 2.0 程度よりも大きい範囲では、砕波による減衰効果がほとんど現れない。このため、計算値は観測値よりもかなり大きくなっている。こうした領域では天端水深に比べて波高が小さいために摩擦減衰があまり働かない。図 - 27 と図 - 28 を比べると、後者の波高伝達率が前者に比べて 0.1 程度下がっているため、底面摩擦によって波高が減衰していないわけではない。

実測値との差異を生じた理由の一つとしては、まずリーフ側面の底面境界条件の不備が考えられる。また、リーフ前法面から沖へ反射される波のエネルギーを無視していることもその一つであり、これは放物型方程式で取り扱うことができない。人工リーフの反射率については系統的な研究が行われていないけれども、泉宮ほか¹¹⁾が数値計算を行った事例では 0.2 ~ 0.4 の反射率を報告している。反射率がもし

0.3 であればエネルギーにして 9% が沖へ運ばれ、エネルギー損失がゼロであっても波高伝達率は 0.95 となる。

また、人工リーフを構成する捨石間の空隙を出入する水流の乱れ抵抗によるエネルギー損失も考えられる。ただし、浸透流による波高減衰については未だよく分かっていない。こうした砕波と底面摩擦以外の減衰機構を適切に数値モデルに組み入れることは今後の課題と考えておきたい。

一方、波高が大きくて相対天端水深 h_t/H_0' が 1.0 以下の領域では、実際よりも波高を低めに見積もる傾向が見られる。糸魚川海岸では h_t/H_0' が 1.0 ~ 2.0 の範囲で観測値とほぼ一致していた。湯河原海岸の人工リーフの場合に計算波高が低く算出された理由としては、本数値モデルに特有な過大な屈折効果によって天端上の波高が増大し、砕波減衰が過大に効いた可能性が考えられる。また、天端水深が小さいときの摩擦減衰を大きく見積もり過ぎていたとも考えられる。今後、人工リーフに対する現地観測がいろいろな海岸で実施され、摩擦係数その他の特性が明らかになることを期待したい。

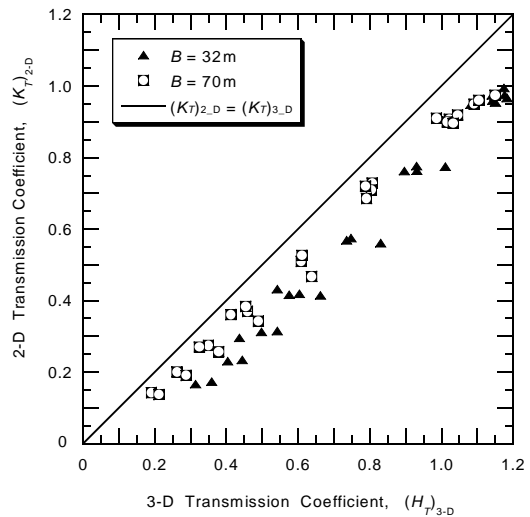


図 - 29 湯河原人工リーフに対する 3次元計算と 2次元計算の波高伝達率の比較

なお、3次元地形に対する図 - 27, 28 の計算結果において相対天端高の絶対値が大きい領域で波高伝達率が 1.0 を超えているのは、本数値モデルの屈折効果の過大評価によるものである。リーフの平面形状を無視して 2次元地形として計算すると、波高伝達率が小さく算出される。図 - 29 はこれを示したもので、横軸が 3次元地形としての波高伝達率、縦軸が 2次元地形としての波高伝達率である。リーフ両端からの波の影響がない場合には、波高伝達率がかなり小さくなるのが明らかである。

なお、2次元計算においては図 - 27, 28 に見られるような波高伝達率が 1.0 を超える現象は起きていない。また、図 - 29 の記号で示される天端幅 $B = 32\text{m}$ と $B = 70\text{m}$ のデータは数個ずつのグループになっ

ており、それを子細に見ていけば天端幅の増加による波高伝達率（計算値）の低下を分析することができる。

6. 人工リーフの波浪減殺特性

(1) 2次元リーフ波高伝達率の簡易推定図表

前節までに示したように、今回開発した数値計算モデルは現地および模型の人工リーフの波高伝達率をかなりよく再現している。そこで、2次元リーフを対象とした波高伝達率の推定図表を作成する。

2次元リーフによる波の減衰は、天端上の水深に規定される砕波および天端表面の摩擦抵抗による減衰が主要因である。しかし、有義波高がリーフ前面の水深の0.4程度を超えると、堤前の砕波減衰の影響も受ける。この3種類の減衰に影響を及ぼす無次元パラメータは次の通りである。

天端砕波： h_t/H_0' , h_t/h , h_t/L_0 または h/L_0
 摩擦抵抗： B/L_0 または B/h および f_w
 前面砕波： H_0/h , h/L_0 および海底勾配

このように複数のパラメータが関与するため、波高伝達率の算定図表の一般化は容易ではない。そこで人工リーフの代表的形状として、まず下記の設置条件を想定する。

設置水深： $h=6.0\text{m}$
 天端水深： $h_t=1.5\text{m}$ ($h_t/h=0.25$)
 法面勾配：1:2.0（表・裏法面も同じ）
 海底勾配： $\tan\theta=0$
 天端幅： $B=0\sim 200\text{m}$

このうち天端幅 $B=40\text{m}$ の人工リーフに、波浪として修正Bretschneider・光易型スペクトルを持つ周期 $T_{1/3}=8.01\text{s}$ （深海波長 $L_0=100.0\text{m}$ ）、有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ の単一方向不規則波が作用したときの状況を計算した結果が図-30である。計算は格子間隔 $x=y=2.0\text{m}$ 、波高成分 $M=61$ 、周波数成分 $2N=20$ で行った。図-30には、天端面の摩擦係数を $f_w=0.01, 0.15$ 、および 0.5 に変えたときの最高波高と有義波高の縦断変化を示している。

有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ に対する最高波高 $H_{\max}=1.8\text{m}$ は水深 1.5m の天端上で激しく砕波し、 $f_w=0.01$ のときにはリーフ天端先端から 35m 付近で 1.03m で安定する。同時に有義波高も 0.80m で一定となる。しかし、天端面の摩擦係数が $f_w=0.15$ であれば波高はさらに減衰を続ける。摩擦係数が $f_w=0.50$ のときにはリーフ先端から底面摩擦による減衰が砕波減衰と同時に働き、リーフ乗の波の進行とともに減衰が強まる。特に、最高波高に対する影響が顕著である。これは、式(3)で示されるように、摩擦による波高減衰係数が相対振幅 a/h に比例するためである。

ここで H_{\max} と $H_{1/3}$ の比率を調べてみると、 $f_w=0.01$ のときには天端先端から 10m 付近で 1.47 倍に落ちた後緩やかに増加し、リーフ背後では 1.59 倍の値

に落ち着く。 $f_w=0.15$ の場合にはリーフ背後の波高比が 1.49 、 $f_w=0.50$ では 1.33 となる。

ここでは図示していないけれども、人工リーフの天端上および背後では $H_{1/10}$, H_{mean} などの $H_{1/3}$ に対する比率もいろいろに変化する。このため、波高伝達特性を吟味する際には、単純に規則波の砕波限界を適用したのでは適切な答えを得ることが出来ない。

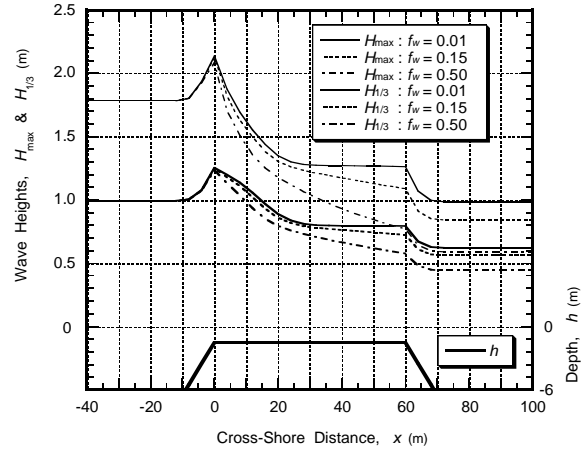


図-30 人工リーフによる波高の縦断変化
 ($H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=8.01\text{s}$, $h_t=1.5\text{m}$)

次に本論文では、人工リーフの波高伝達率の一般的特性を求めるため、支配パラメータを以下の範囲で変化させて計算を行った。摩擦係数は糸魚川海岸の観測事例を参照して、全て $f_w=0.15$ とした。

$h/L_0 = 0.03, 0.06, 0.10$ ($T_{1/3}=11.32, 8.01, 6.20\text{s}$)
 $h_t/H_0' = 2.5 \sim 0.25$ ($H_0'=0.60 \sim 6.0\text{m}$)
 $h_t/h = 0.10, 0.25, 0.40$
 $B/L_0 = 0 \sim 1.0$ ($B=0 \sim 200\text{m}$), あるいは
 $B/h = 0 \sim 20.0$ ($B=0 \sim 120\text{m}$)

波高伝達率を定義する場合、基準波高として換算沖波波高あるいは人工リーフ設置位置での通過波高のいずれを用いるかの問題がある。田中¹²⁾は前者を用いており、ここでもその方式を用いる。その場合の $K_T = H_T/H_0'$ の表示法としては、田中が相対天端幅 B/L_0 をパラメータとして、伝達率を相対天端水深 h_t/H_0' に対してプロットする方式を提示し、この算定図表がしばしば引用される。ここでは相対天端幅の影響を吟味する意味で、相対天端水深 h_t/H_0 をパラメータとし、波高伝達率 K_T を相対天端幅 B/L_0 に対してプロットしてみた結果が図-31, 32である。

図-31は天端水深 $h_t=1.5\text{m}$ ($h_t/h=0.25$) のリーフに周期 8.01s の波が作用した場合 ($h/L_0=0.06$) である。パラメータである相対天端水深の値を7通りに変えたもので、天端水深が波高に比べて浅いほど波高伝達率が小さくなり、また天端が広くなるにつれて波高伝達率が減少することを示している。

図-32は、こうした波高伝達率と相対天端水深の関係に対して、波の周期が及ぼす影響を例示したものである。相対天端水深を3通りに限定し、それぞれについて $h/L_0=0.03, 0.06, 0.10$ の場合の波高伝達率

を表示した。相対水深 h/L_0 が小さくなるにつれて波高伝達率が低下しており、相対天端幅 B/L_0 が大きいほど周期の影響が顕著になる。これは、横軸の相対天端幅を同一にするためには、周期と波長の長い波ほど天端幅の絶対値が大きいことによる。たとえば、周期 6.20s の波は波長 $L_0 = 60\text{m}$ であるのに対し、周期 11.32m の波は波長 $L_0 = 200\text{m}$ である。したがって、相対天端幅 $B/L_0 = 0.5$ というのは、前者の波では $B = 30\text{m}$ であり、後者の波では $B = 100\text{m}$ となる。したがって、後者では摩擦減衰の影響を強く受けることになり、波高伝達率が低下する。すなわち、波高伝達率は天端幅の絶対値に影響される。

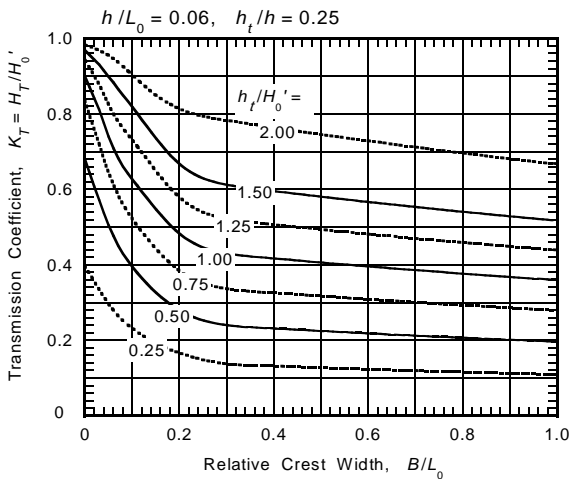


図 - 31 人工リーフの波高伝達率と相対天端幅の関係 ($h = 6.0\text{m}$, $h_t = 1.5\text{m}$, $T_{1/3} = 8.01\text{s}$)

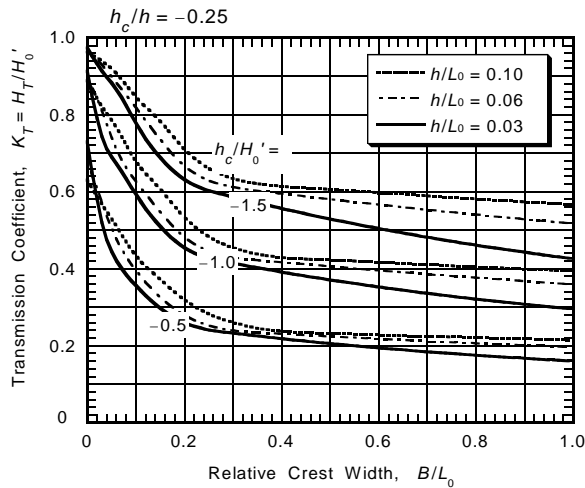


図 - 32 人工リーフの波高伝達率と相対天端幅の関係に及ぼす相対水深の影響 ($h_t/h = 0.25$)

そこで、天端幅と設置水深との比 B/h をパラメータとして波高伝達率をプロットした結果が図 - 33 である。波周期の影響を相対水深 h/L_0 の形で取り入れ、相対水深 0.03, 0.06, 0.10 の 3 種類で比較している。図中では、相対水深 h/L_0 の値に応じて破線、1 点鎖線、実線を使い分けている。ただし、天端水深は図 - 31 と同じく、 $h_t = 1.5\text{m}$ ($h_t/h = 0.25$) の場合である。

この表示法を採ると、相対水深の影響が小さく表される。

相対水深による波高伝達率の差が大きいのは、相対天端幅 $B/h = 2$ のケースであり、このケースの $h/L_0 = 0.03$ の曲線は $B/h = 1$ のケースの $h/L_0 = 0.10$ の曲線と交差している。

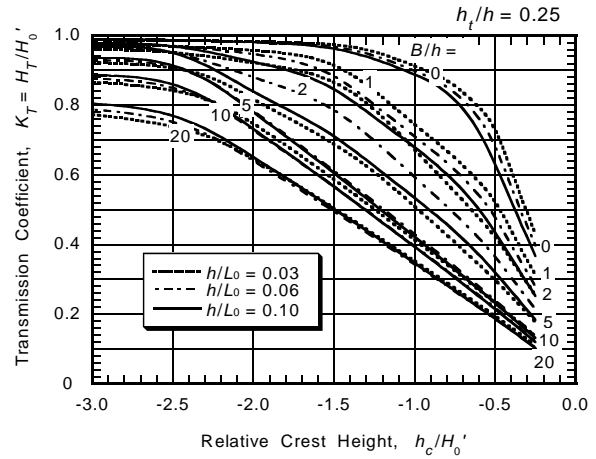


図 - 33 2次元人工リーフの波高伝達率の算定図表 ($h_t/h = 0.25$)

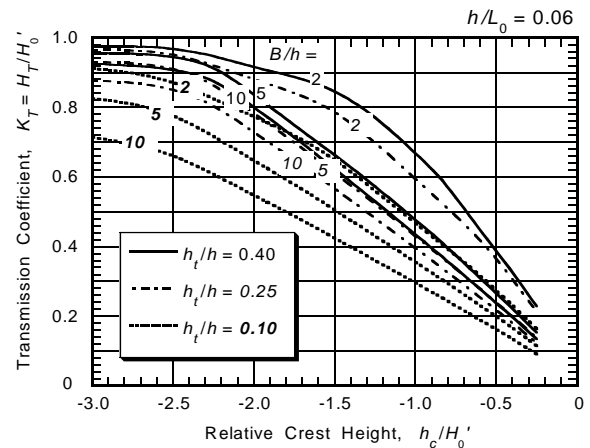


図 - 34 2次元人工リーフの相対高さによる波高伝達率の差異の比較 ($h_c/L_0 = 0.06$)

図 - 33 のように波高伝達率を相対天端水深 h_t/H_0' に対してプロットすると、相対天端水深が小さい範囲では、波周期の短いケースのほうが波高伝達率が低くなる。これは、周期が短くなるにつれて碎波限界波高が低くなるためである。ただし、天端水深に比べて波高が小さいときには、波周期の影響が逆転する。こうした逆転が起きている領域では、波高の減衰は底面摩擦によるエネルギー損耗が原因であり、碎波の影響はほとんどない。底面摩擦による減衰係数は式 (3) のように無次元波数 kh の関数である。人工リーフの天端上のように水深が浅いときは付録の式 (A.9) のような漸近式が適用可能であるけれども、子細に見ると周期の長い波ほど摩擦減衰の影響が強めに現れる。相対天端幅が大きいほど周期の影響が強く現れることは、このことを裏付けている。

図 - 33 は設置水深 6.0m, 天端水深 1.5m, 相対天端水深 $h_t/H_0' = 0.25$ の場合である。他の条件が同じでも, 海底からの人工リーフの高さが異なれば, 波高伝達率も異なってくる。図 - 34 はこの点を検討したもので, 人工リーフの相対高さを天端水深と設置水深の比で代表させ, この比率を $h_t/h = 0.10, 0.25, 0.40$ に変えて波高伝達率比較した。 $h_t/h = 0.10$ のように人工リーフの天端水深が小さいときには, 摩擦減衰が大きくなり, 波高伝達率が低下し, 相対天端幅 B/h が大きいほど人工リーフの相対高さによる差が大きくなる。

これまで述べたように, 2次元人工リーフの波高伝達率は幾つものパラメータに支配される。これを関数表示すれば次のようになる。

$$K_T = \frac{H_T}{H_0'} = F(h_t/H_0', B/h, h/L_0, h_t/h; f_w) \quad (4)$$

人工リーフの設置水深と波高との比 h/H_0' は, 相対天端水深 h_t/H_0' を天端水深と設置水深の比 h_t/h で除して求められる。水深波高比が小さいときには, 人工リーフに波が到達する前に砕波減衰の影響を受ける。図 - 33 では, $|h_c/H_0'| < 0.5$ の領域で $h/H_0' < 2.0$ となり, この範囲では砕波影響を含めた波高伝達率を表示している。

(2) 波高伝達率に及ぼす潮位の影響

人工リーフを実際に計画する場合には, 波高伝達率よりも背後への伝達波高の絶対値が背後の海浜に対する防護機能に関係する。その場合には, 対象地点の潮位変動によって伝達波高が異なるので, 入射波高をいろいろ変えて伝達波高の算定曲線を求めておくことと便利である。一例として, 図 - 35 のような2次元人工リーフを想定し, その伝達波高を計算した結果を図 - 36 に示す。

人工リーフは天端水深が $h_t = 1.50\text{m}$, 設置水深が $h = 7.5\text{m}$, 天端幅が $B = 37.5\text{m}$ と 75.0m であり, 朔望高潮位が $\text{HWL} = +1.50\text{m}$, 朔望低潮位が $\text{LWL} = \pm 0.0\text{m}$ であるとする。法面勾配は $1:3$ である。周波数スペクトル, 格子間隔等の計算条件はこれまでと同じである。また, 周期は 3.0s を下限として波高に応じて大きくなるように調整した。

この試算例では, 入射波高が 1.0m 程度以下の時には波がほとんど減衰しないけれども, 波高が増加するにつれて, リーフによる減衰効果が顕著に現れる。これは砕波および底面摩擦によるエネルギー損耗が同時に働くためと考えられる。波高 1.5m 以上に着目すると, 潮位が 1.5m 高くなることによって天端幅 37.5m では伝達波高が $0.5 \sim 0.9\text{m}$ 増加し, 天端幅 75m では $0.5 \sim 0.8\text{m}$ 増加する。なお, 天端幅を2倍にしたことによって, 伝達波高は最大で 0.4m 程度低下する。入射波高の小さい範囲では, 天端幅を広げても伝達波高の絶対値はあまり低減しない。ただし, 本数値モデルでは人工リーフのマウンド内への浸透流等による減衰効果を取り込んでいないので,

実際には天端幅の影響がこれよりも大きい可能性はある。

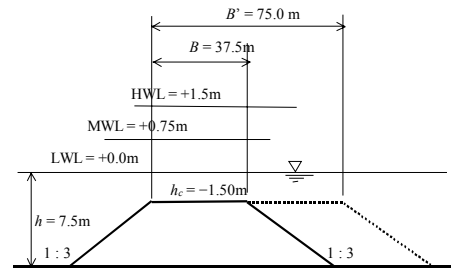


図 - 35 伝達波高を試算する人工リーフの断面形状

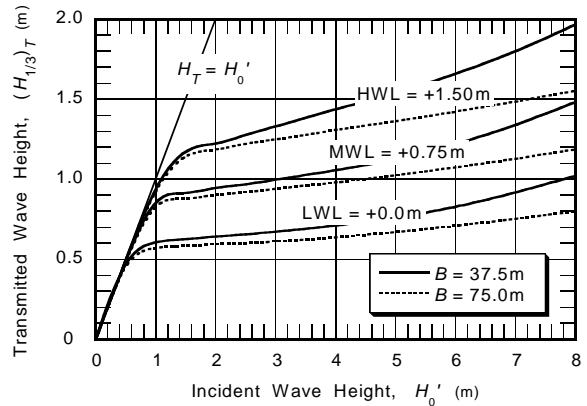


図 - 36 人工リーフの伝達波高の試算結果

ここに示したのは一つの試算例であり, 実際の人工リーフの計画では, 現地の波浪・潮位の条件に合わせて人工リーフの形状をいろいろ変えた計算を行い, 建設費等を勘案して最適な形状を選定すればよい。

(3) 平均波高伝達率に及ぼす開口幅の影響

前に紹介した糸魚川海岸の人工リーフは堤長が 930m と極めて長いけれども, 一般には堤長数十 $\text{m} \sim 100\text{m}$ 程度のものを複数基, ある間隔を空けて設置する。これは, 人工リーフを越えた波による質量輸送によって背後の水位が高まり, 人工リーフの端から強い戻り流れが発生するのを制御するためである。しかし, 開口部からの侵入波によって, 堤内側の波高が増大し, 波浪の減殺効果が弱められる。

こうした開口幅の影響を大局的に評価するには, エネルギー的に考察するのが一つの方法である。すなわち, 今開口幅が S , 堤長が A であり, 人工リーフを越えた波に周期変化がないものとする。2次元リーフの波高伝達率を $(K_T)_{2D}$ として, 人工リーフを越えた部分の波の総エネルギーフラックスは $A(K_T)_{2D}^2 H_0'^2$ に比例する。一方, 開口部を通過する波のエネルギーフラックスは幅 $S H_0'^2$ に比例する。したがって, 人工リーフ背後についてエネルギー平均波高に関する波高伝達率を求めるならば, 次のように算定することが可能である。

$$(K_T)_{mean} = \sqrt{\frac{S + A(K_T)_{2D}^2}{S + A}} = \sqrt{1 - \frac{1 - (K_T)_{2D}^2}{1 + S/A}} \quad (5)$$

ここに、 $(K_T)_{mean}$ は人工リーフ背後のある範囲にわたってのエネルギー平均波高についての伝達率であり、 $(K_T)_{2D}$ は2次元リーフの波高伝達率である。この式の誘導に当たっては、波の屈折・回折現象を考慮していない。開口幅が狭いときには波の直進の度合いが減少し、リーフ天端上への回りこみが大きくなる。その結果、天端上での砕波が助長されて波高が減少し、波高伝達率が低減すると考えられる。したがって、式(5)は3次元リーフの平均波高伝達率を大きめに評価しているといえよう。

この式(5)の妥当性を検討するため、屈折効果が小さいと考えられる次のような天端幅0mの人工リーフについて計算を行った。

設置水深： $h=6.5\text{m}$ ， 海底勾配： $\tan\theta=0$
 天端水深： $h_t=0.5\text{m}$ ($h_t/h=0.077$)
 法面勾配：1:3.0 (前後面)，1:0.1 (側面)
 天端幅： $B=0\text{m}$ ， 堤長： $A=96\text{m}$
 開口幅： $S=0, 8, 16, 24, 48, 72, 96\text{m}$
 波浪条件： $H_0'=2.0\text{m}$ ， $T_{1/3}=8.01\text{s}$ ， $S_{max}=25$

なお、側面法勾配を1:0.1と急にしたのは、端部からの波の屈折影響をできるだけ軽減するためである。また、人工リーフは3基を $x=0\text{m}$ の軸線上に配置した。

方向スペクトルは糸魚川海岸、湯河原海岸の場合と同じであるが、成分数は20個とした。格子間隔は $x=2.0\text{m}$ ， $y=4.0\text{m}$ とし、波高成分は $M=61$ である。このうち、開口幅 $S=0\text{m}$ の離岸潜堤のケースは2次元地形として計算し、波高伝達率 $(K_T)_{2D}=0.303$ の結果を得ている。

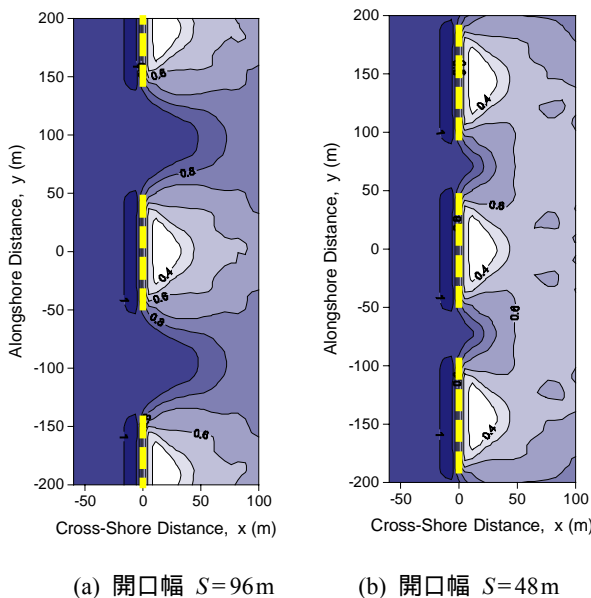


図 - 37 天端幅 $B=0\text{m}$ の場合の等波高比線図

計算結果のうち、開口幅が96mと48mの場合の等

波高比線図を図 - 37 に示す。太い白破線はリーフの天端を示している。人工リーフの中央背後では波高比が0.4以下となり、2次元地形の場合と同じ結果である。しかし、開口部からは回折波が進入するため、人工リーフの端部から波高比の大きな等分布線が背後へ入り込む。この水深における波長は $L_{1/3}=60\text{m}$ であるので、開口比は $S/L_{1/3}=1.6$ と 0.8 となる。等波高比線の分布は、方向スペクトル波浪に対する防波堤の回折図にほぼ近く、開口部から波が回折していることが認められる。

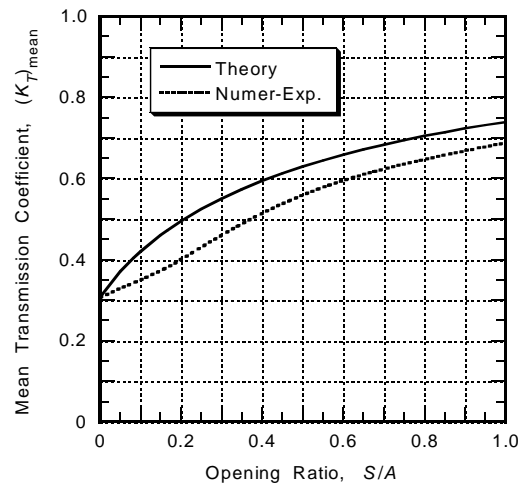


図 - 38 平均波高伝達率と人工リーフ開口比の関係

離岸堤背後の波高の計算結果については、中央の人工リーフを挟み、両側の開口部の中心線に至る領域 $[S/2+A+S/2]$ の範囲について波高の2乗の平均値を求め、エネルギー平均波高を算出した。そしてこの波高に対する波高伝達率 $(K_T)_{mean}$ を計算し、これを開口比 S/A に対して表示した結果が図 - 38 である。図中の実線で示す理論値は式(5)によるものであり、破線は数値計算の結果を平滑化したものである。

図 - 38 では、人工リーフ周辺の波高分布の計算結果から求めた平均波高伝達率が式(5)の理論値よりもやや低めである。これは前述のように、開口部からの波の屈折・回折現象を考慮していないためであり、予測どおりといえる。ここに示したのは天端幅 $B=0\text{m}$ の場合である。実際の人工リーフは有限な天端幅を持つので、屈折効果を過大に評価する本数値モデルほどではないにしても、天端上への波の屈折によって砕波が助長され、波高伝達率は図 - 38 に示される以上に低減されると考えられる。

(4) 平均波高伝達率に及ぼす縦横比の影響

人工リーフの波浪減殺効果はリーフの縦横比の影響も受ける。これを例示したのが図 - 39 である。対象とした人工リーフの形状および波浪諸元は次のようなものである。

設置水深： $h=7.5\text{m}$ ， 海底勾配： $\tan\theta=0$
 天端水深： $h_t=1.5\text{m}$ ($h_t/h=0.20$)
 法面勾配：1:3 (前後面)，1:0.1 (側面)

天端幅 : $B=32\text{m}$,
 堤長 : $A=16, 32, 64, 96\text{m}$
 開口比 : $S/A=0.5, 1.0$
 波浪条件 : $H_0'=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=8.01\text{s}$, $S_{\max}=25$

これらの人工リーフの基数と設置範囲は表 - 2 の通りである。

表 - 2 人工リーフの基数および配置

天端幅 B (m)	堤長 A (m)	開口幅 S (m)	基数	設置範囲 $\pm y$ (m)
32.0	96.0	96.0	5	± 432.0
32.0	96.0	48.0	5	± 336.0
32.0	64.0	64.0	5	± 288.0
32.0	64.0	32.0	5	± 224.0
32.0	32.0	32.0	7	± 208.0
32.0	32.0	16.0	9	± 208.0
32.0	16.0	16.0	11	± 168.0
32.0	16.0	8.0	15	± 176.0

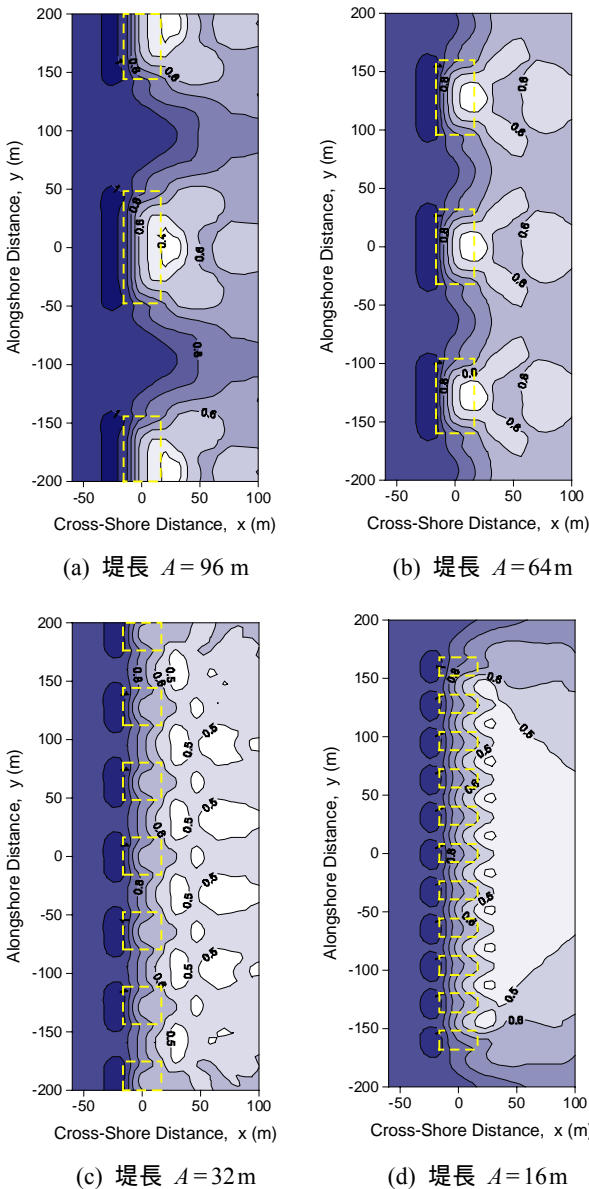


図 - 39 開口比 $S/A=1.0$ の場合の等波高比線図

波浪のスペクトル特性および格子間隔等は図 - 37, 38 の場合と同じである。人工リーフの横法面は波の屈折効果が過度に現れないように勾配 $1:0.1$ とした。人工リーフはその中心が $x=0\text{m}$ の軸線上に揃うように設置した。この人工リーフの2次元地形の波高伝達率は図 - 31 から $(K_T)_{2D}=0.34$ と推定される。

図 - 39は、開口比を $S/A=1.0$ に設定した場合の堤長の影響を比較したものである。堤長が $A=96\text{m}$ で開口幅が $S=96\text{m}$ のときには、波長に対する相対開口幅は $S/L=1.6$ である。しかし、堤長が短くなるにつれて相対開口幅も小さくなり、 $A=16\text{m}$ では $S/L=0.4$ となる。

図から明らかなように、堤長ならびに開口幅の絶対値が大きいときには、人工リーフ背後の遮蔽域と開口部からの回折波領域の差が判然としている。しかし、堤長が短くなって波長に対する開口比が小さくなるにつれて、遮蔽域と回折波領域との差があいまいになってくる。すなわち、それだけ波が開口部から進入しにくくなっている。

図 - 39(d) の堤長 $A=16\text{m}$ の場合などは、縦長の人工リーフのそれぞれの軸線上で波高がやや大きく、開口部を通る軸線上で波高がやや小さくなっている。これは、屈折によって波がリーフの上へ集まるためであり、このことは先に造波水路の側壁の鏡面効果を利用して行った無限個数配置の実験結果でも示されている(文献⁵⁾の図 - 4参照)。

こうした結果、人工リーフの縦横比 B/A が大きくなるにつれて、複数基の人工リーフが一つのまとまったユニットとして機能するようになる。堤長 $A=96\text{m}$ の場合に各リーフが単独に波を遮蔽し、開口部については遮蔽効果が全く見られない状況と対照的である。海岸保全の立場からいえば、図 - 39(d) のように複数基の人工リーフが一体となって海浜を防御することが望ましい。

人工リーフの波浪減殺効果が縦横比 B/A によって変化する状況を調べるため、平均波高伝達率が岸沖方向にどのように変わるかを調べた結果が図 - 40, 41 である。波高の平均区間は、表 - 2 に示す人工リーフ群の設置範囲、すなわち最も外側のリーフの外縁を結ぶ範囲である。図 - 40 は開口比が $S/A=1.0$ の場合、図 - 41 は $S/A=0.5$ の場合である。人工リーフの天端は $x=-16\sim+16\text{m}$ の位置にある。図の左端の $x=-20\text{m}$ の地点はリーフの前法面の途中であり、浅水変形によって波高比が 1.0 を超えている。しかし、波がリーフ上を進むにつれて平均波高伝達率は急速に減少し、やがて一定値に落ち着く。ただし、堤長が短い場合には図 - 38(d) に見られるように、リーフ群の両側から回折してくる波の影響によって、平均波高伝達率は $x=36\text{m}$ 付近で最小値を取り、それよりも岸側では徐々に増大する。

図 - 40, 41 から分かるように、平均波高伝達率は人工リーフの形が縦長になるにつれて低減する。この状況を明らかにするため、各ケースの最小値を取り上げてこれを人工リーフの縦横比 B/A に対してプ

ロットした結果が図 - 42 である。原点である $B/A = 0$ の場合の波高伝達率は、2次元リーフとしての値 $(K_T)_{2D} = 0.34$ を用いて式 (5) で推定したものである。

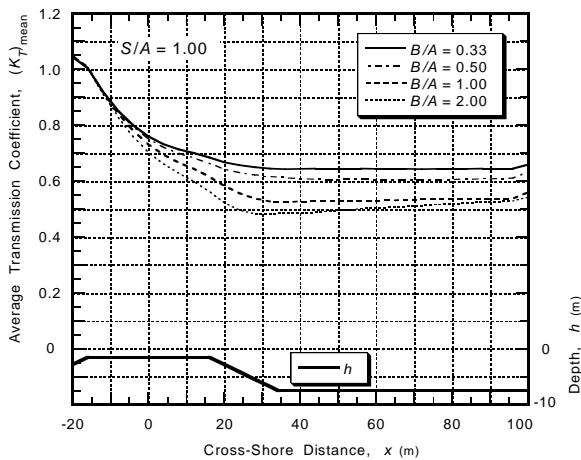


図 - 40 平均波高伝達率に及ぼす人工リーフの形状の効果 ($S/A = 1.00$)

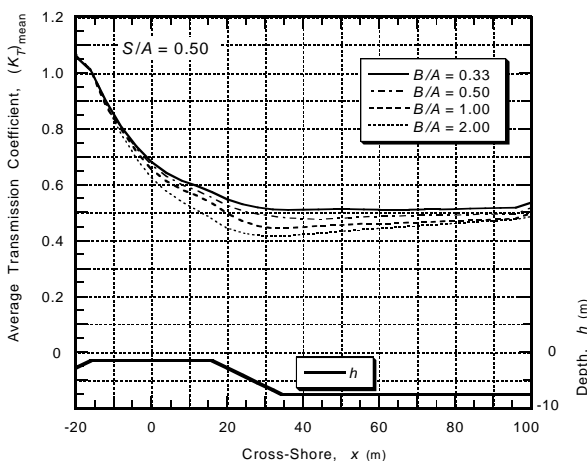


図 - 41 平均波高伝達率に及ぼす人工リーフの形状の効果 ($S/A = 0.50$)

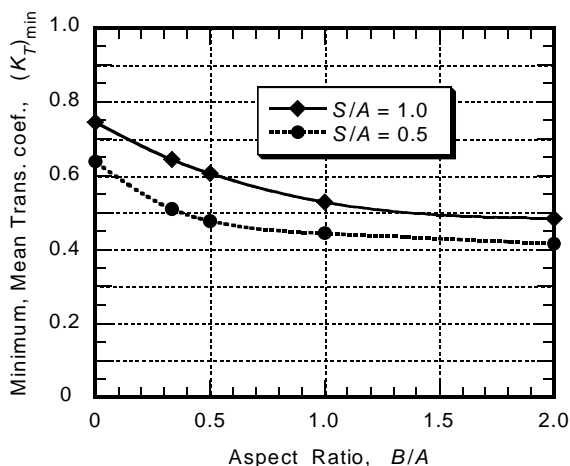


図 - 42 3次元人工リーフの平均波高伝達率に及ぼす人工リーフの形状の効果

ここに示した結果から、人工リーフの縦横比 B/A が大きくなる、すなわちリーフが縦長になるほど平均波高伝達率が小さくなり、波浪減殺効果が向上することが明らかである。

著者は先に人工リーフの新しい形式として縦型リーフを提唱した⁵⁾。その際には人工リーフ周辺の波浪場を解析するための数値モデルが未整備であったため、横型リーフに対する優位性を明示することができなかった。しかし、今回の数値解析によって、縦型人工リーフがこれまでの横型リーフよりも波浪減殺効果に優れていることが例証されたといえる。

縦型・横型の区別は便宜的なものであるが、あえて分ければ堤長 A が天端幅 B よりも小さいもの ($B/A > 1$) が縦型人工リーフ、堤長が天端幅よりも大きいもの ($B/A < 1$) が横型人工リーフであろう。図 - 42 における開口比 $S/A = 1.0$ と 0.5 の二つの曲線を比べてみると、開口比 0.5 の横型リーフ ($B/A = 0.33$) の平均波高伝達率は、開口比 1.0 の縦型リーフ ($B/A = 2.0$) よりもやや大きくなっている。すなわち、開口比の小さい横型リーフは、開口比の大きな縦型リーフよりも海岸線延長あたりで多量の建設資材を必要とする。しかし、開口部の背後を含めた平均の波浪防御効果は縦型リーフよりも劣っている。さらに、縦型リーフは背後の水位上昇が小さく、開口部から沖へ向かう離岸流の流速も小さい長所がある。

なお、図 - 40 ~ 42 の計算結果は、前述のようにリーフの横法面の勾配を $1 : 0.1$ と鉛直に近く設定したものである。実際の構造物では法面勾配が $2 \sim 3$ 割勾配であり、斜面部分がかなりの幅を持つ。ここに示した計算結果を参照する際には、天端面での堤長 A や開口幅 S でなく、法面中央で測った有効堤長 A' と有効開口幅 S' を用いる必要がある。

たとえば、水深 7.5 m の箇所に堤高 6.0 m の縦型人工リーフを横法面勾配 2 割勾配で建設する場合には、斜面部分が 12.0 m となり、法尻で両側からの法面がぶつからないためには天端面で 24.0 m の空きが必要である。法尻での空きを 12.0 m にとると、天端面での開口幅は $S = 36.0$ m であり、有効開口幅が $S' = 24.0$ m となる。天端面での堤長を $A = 12.0$ m とすると、有効堤長が $A' = 24.0$ m である。天端幅を $B = 48$ m とすると、上述の縦横比 $B/A' = 2.0$ 、開口比 $S'/A' = 1.0$ の条件に一致する。

これに対する $B/A' = 0.33$ の横型人工リーフは、堤長が $A' = 144$ m、 $A = 132$ m、開口幅が $S' = 72$ m、 $S = 84$ m である。この有効堤長の範囲には、上記の縦型リーフ 3 基がはまることになるので、 2 箇所開口部の分だけ、捨石等の建設材料が節約になる。縦型・横型人工リーフの性能比較は、最終的には模型寸法が十分に大きくて縮尺効果の影響のない水理実験で確認する必要がある。しかし、本数値モデルによって人工リーフの波浪減殺機能に対する支配パラメータが明らかになったので、今後は実験計画を適切に立案することが可能である。

(5) 横型リーフと縦型リーフの比較事例

これまでに述べた横型リーフに対する縦型リーフの優位性を検証するため、やや現実的な状況について波高伝達率の比較計算を行ってみる。計算条件は次のようなものである。

- リーフ中央水深：DL-5.0m,
- 海底勾配： $\tan \theta = 1/50$
- 潮位：LWL=0.0m, HWL=1.0m
- 波浪条件： $H_0' = 0.5 \sim 3.0\text{m}$,
 $T_{1/3} = 8.01\text{s}$, $S_{\max} = 25$
- 天端水深： $h_c = -1.0\text{m}$
- 法面勾配：1:2 (前後面), 1:2 (側面)
- 天端幅： $B = 40\text{m}$,
- 横型リーフ (天端面)
 - 堤長： $A = 80\text{m}$
 - 開口幅： $S = 48\text{m}$
- 縦型リーフ (天端面)
 - 堤長： $A = 10\text{m}$
 - 開口幅： $S = 20\text{m}$

この横型リーフ3基と縦型リーフ12基の配置を図-43に示す。なお、有効堤長では横型リーフが約 $A' = 88\text{m}$ 、縦型リーフが約 $A' = 18\text{m}$ であり、堤体材料の使用量としては後者の方が前者の約82%である。また有効開口比は横型が $S'/A' = 0.45$ 、縦型が $S'/A' = 0.67$ である。

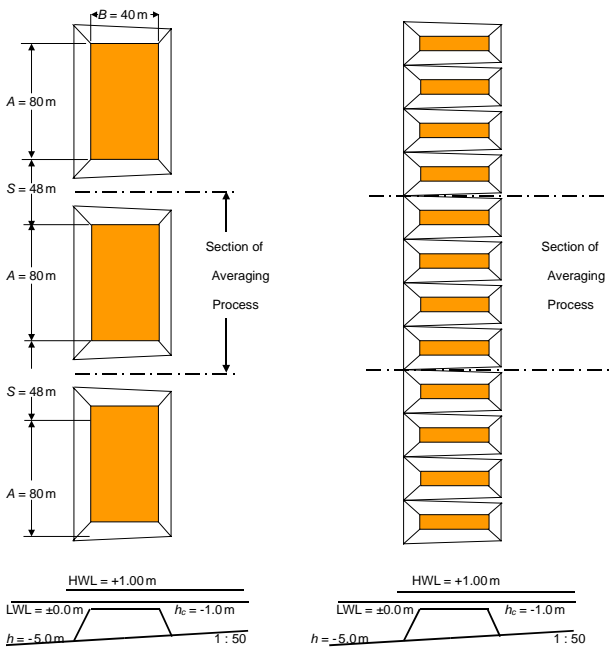


図-43 比較検討対象の横型・縦型リーフの配置

この2種類の人工リーフに $H_{1/3} = 2.0\text{m}$ の波が入射したときの波高分布を図-44に示す。波高の等値線は0.1mおきに描いてある。定性的には図-39と類似しているけれども、海底の傾斜の影響があり、ま

た等分布線の間隔が細かいので若干異なる印象を与える。

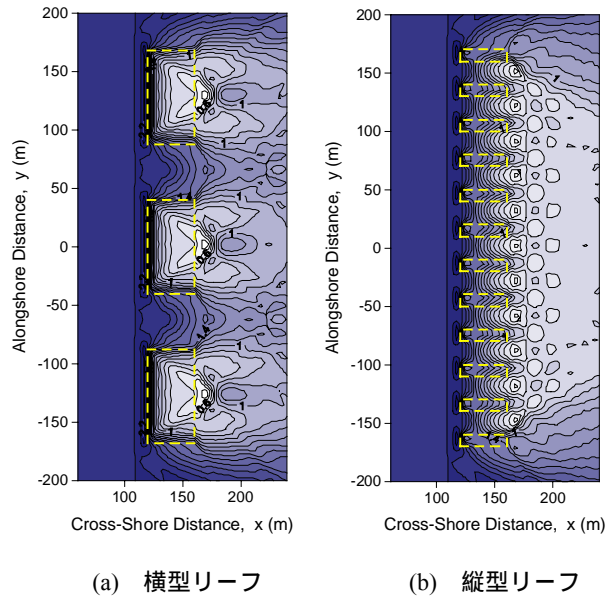


図-44 横型リーフと縦型リーフ周辺の有義波高の分布

リーフの性能比較としては、図-43の中に示した一点鎖線の範囲について求めたエネルギー平均の有義波高を用いる。この波高の岸沖方向の変化を、入射波高 $H_{1/3} = 1.0, 2.0, 3.0\text{m}$ の場合について図-45に示す。

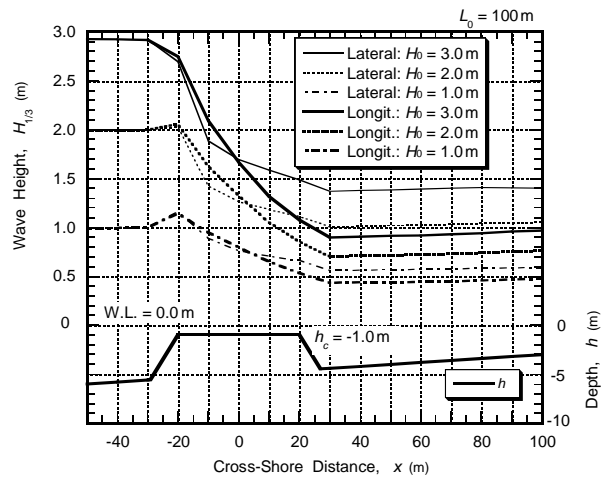


図-45 エネルギー平均有義波高の岸沖方向分布

図中の太線が縦型リーフ、細線が横型リーフである。図から明らかなように、縦型リーフではリーフの前半部分で横型よりも波高が大きく、後半部で急速に減少する。これは縦型リーフでは側法面による波の屈折効果によって天端上に波が集中し、この波高が急増した波が砕波によって効果的に減衰することを表している。

これまでに繰り返して述べるように、本数値モデルではこの屈折効果が過剰に表現されている懸念があるため、縦型リーフの波高減衰効果が数値計算で

得られたほど発揮されるか疑問な点はある。しかし、3(1)で紹介した縦型リーフの実験結果に対してはほぼ適合していたので、縦型の場合には数値モデルの適用性が高いと考えられる。

図-45においてリーフから離れるにつれて縦型リーフの波高がゆるやかに増加する傾向が見られるのは、リーフ群の上下端からの波の回り込みの影響である。そこで、エネルギー平均波高の最小値について入射波高に対する変化を示したのが図-46である。

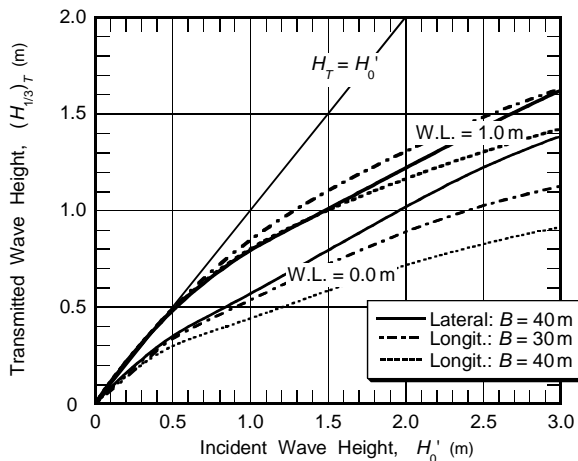


図-46 横型リーフと縦型リーフの伝達波高の比較

この図で明らかのように、潮位の低いときは全ての波高に対して縦型リーフのほうが横型よりも伝達波高が低い。潮位が高くなると入射波高が1.5m以下では差がないけれども、それよりも大きな入射波に対しては伝達波高が低くなる。このように、天端長が同じであっても縦型リーフのほうが好成績であるため、天端長を10m縮めて $B=30\text{m}$ としたケースも示してある。潮位が低いときには、それでも $B=40\text{m}$ の横型リーフよりも高い波浪制御性能を示している。堤体の体積で言えば、 $2/3$ 以下である。

本論文で紹介した各種形状の人工リーフの比較計算は水深、周期、開口幅など、ある特定の条件についてのものである。開口部からの回折波の進入状況は、開口幅と波長の比に影響される。したがって、繰り返すようであるが、現地の設置条件に合わせた数値計算をいろいろ行い、建設費その他のファクターを勘案しながら最適な形状と大きさを選ぶことが必要である。しかしながら、今回の計算で例示したように、これまでの人工リーフの実施例に見られるような横型よりも、縦型のほうが波浪減殺効果に優れていることを考慮して、人工リーフを計画することが望ましいといえる。

7. むすび

本論文で得られた成果をまとめると以下のように

なる。

- 先に発表した段階的碎波係数を取り入れた不規則波の変形計算手法を人工リーフに適用したところ、室内実験および現地海岸での波高測定結果とほぼ一致する結果が得られ、その適用性が確認された。
- この数値モデルは海底地形の勾配が緩やかなことを前提とする放物型方程式を基本としているため、人工リーフのような急勾配の地形に適用すると、リーフ側面の急斜面による波の反射を無視し、リーフ天端面と開口部分との水深差に起因する波の屈折効果が過大に表現される。これがどれほどの影響を及ぼすかについては、水理模型実験によって確認しておくことが望ましい。
- リーフ表面の摩擦係数は、糸魚川海岸の人工リーフにおける波高観測結果に対して0.1と0.2の中間の値が適合した。
- 湯河原海岸の人工リーフの波高観測結果に対する計算結果は、波高が小さいときには過大、波高が大きときには過小の傾向であった。前者についてはリーフ内部への浸透流によるエネルギー減衰、後者については過大な屈折効果による碎波減衰の増大あるいは摩擦係数の過大評価の可能性がある。
- リーフ表面の摩擦抵抗による波高減衰は、天端水深に比べて波高が小さいときだけでなく、顕著な碎波が生じるような波高の大きなときでも無視できない大きさである。
- 2次元リーフの波高伝達率を支配するパラメータは、主として相対天端水深 h_t/H_0' とリーフの相対高さ h_r/h 、および相対天端幅 B/h であり、これに相対水深 h/L_0 の影響が加わる。
- 人工リーフ表面の摩擦係数を0.15に設定した場合の2次元リーフの波高伝達率の算定図表が作成された。
- 開口部を含めた人工リーフ背後域へ伝達される波浪エネルギーの平均値に対応する平均波高伝達率の推定式を、2次元リーフの波高伝達率と開口比の関数として導き、その妥当性を数値計算で検証した。この推定式は開口部からの波の屈折・回折効果は無視しているため、実際よりも大きめの値を与える。
- 平均波高伝達率は、人工リーフの天端幅と堤長との比、すなわち縦横比が大きくなるにつれて減少する。このため、在来の横型リーフよりも縦型リーフのほうが波浪減殺効果に優れている。
- 縦型人工リーフは横型人工リーフと比べて、同一の建設資材量でより効果的に波浪を減殺するだけでなく、背後水域の水位上昇や開口部の戻

り流れの問題が少ないため、今後の人工リーフの計画において積極的に取り上げていく効用が大きい。

また、今後検討が必要な事項は、たとえば以下のとおりである。

- ・ 現地観測あるいは模型寸法の十分大きな水理実験に基づくリーフ表面の摩擦係数の再評価。
- ・ リーフ内部への波動運動に伴う浸透流によるエネルギー減衰の確認とその定量化。
- ・ 急傾斜の底面境界条件を取り込んだ新しい数値モデルの開発（多方向スペクトル波浪の碎波変形を考慮）。

なお本論文のとりまとめに当たっては、著者自身が新たな実験や現地観測を行っているわけではなく、これまでにいろいろな方が発表された研究成果を検証データとして利用させて頂いた。諸研究の成果に敬意を表するとともに、今後の研究の発展によって本論文で紹介した数値モデルの妥当性がさらに検証され、実際の人工リーフの計画に活用されることを期待する次第である。

参考文献

- 1) 合田良実：段階的碎波係数を導入した3次元地形場の不規則波浪変形計算，海洋開発論文集，第18巻，pp. 197-202, 2002.
- 2) 合田良実：不規則波浪変形計算における段階的碎波係数の導入について（Ver. 4），ECOH/YG 技術論文 No.2, 2003年4月20日, 18p.
- 3) 合田良実：段階的碎波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良，海洋開発論文集，第19巻，2003(登載決定)
- 4) 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿：人工リーフの平面性能評価に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp. 821-825, 2002.
- 5) 合田良実：屈折効果を利用した縦型人工リーフシステムの特性について，土木学会論文集，No. 663/II-53, pp. 55-67, 2000.
- 6) 平口博丸・丸山康樹：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, 1986.
- 7) 平口博丸・丸山康樹：斜め入射波に対する波浪変形計算法 新しい放物型方程式の提案，電力中央研究所報告，U86045, 23p., 1987.
- 8) 合田良実・高木泰士：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，海洋開発論文集，Vol. 13, pp. 31-36, 1997.
- 9) 宇多高明・森下 襄・早津誠一：糸魚川海岸における人工リーフ周りの波，流れ，漂砂の現地観測，海岸工学論文集，第37巻，pp. 489-493, 1990.
- 10) 大中 晋・吉沢央明：人工リーフの天端幅の違いによる波浪低減効果および反射率に関する現地調査，海岸工学論文集，第39巻，pp. 641-645, 1992.
- 11) 泉宮尊司・古俣弘和・水上 淳：透過性波浪制御構造物の線形抵抗係数および局所的反射率に関する研究，海岸工学論文集，第37巻，pp. 544-548, 1990.
- 12) 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.
- 13) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸工学，共立出版，pp. 83-90, 1979.
- 14) 堀川清司編：海岸環境工学，東京大学出版会，p. 67, 1985.
- 15) 榎木 亨・出口一郎：新編海岸工学，共立出版，pp. 62-64, 1996.
- 16) 文献13) p. 65

付録：底面摩擦による波高減衰について

波が浅海域を伝播するときに海底面の摩擦応力によって減衰するプロセスについては、岩垣・榎木¹³⁾が詳しく解説している。基本となるのは、次の波エネルギー輸送の平衡式である。

$$\frac{d}{dx}(c_G E) = -\bar{E}_f \quad (\text{A.1})$$

ここに、 c_G は波の群速度、 E は波のエネルギー密度、 \bar{E}_f は1周期で平均したエネルギー逸散率である。海底面の境界層が層流である場合には、エネルギー逸散率が次のように導かれている。

$$\bar{E}_f \approx \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2 kh} \quad (\text{A.2})$$

ここに、 μ は水の粘性係数、 β は係数で $\sqrt{\sigma/2\nu}$ として定義され、長さの-1乗の単位を持つ（ただし σ は角周波数で $2\pi/T$ 、 ν は動粘性係数）、 k は波数である。

水深が一定の場合について式(A.2)を式(A.1)に代入して若干の演算を行うと、波高に関する微分方程式が次のように導かれる。

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{2\nu\beta k^2}{\sigma(2kh + \sinh 2kh)} H \quad (\text{A.3})$$

この微分方程式を解くと波高 H が指数関数的に減衰することが導かれる。また、この式を本文中の式(1)と比べると明らかなように、右辺の分数式が減衰関数 f_D に相当する。上の分数式をやや整理して表すと、減衰関数 f_D が次のように表記されることになる。

$$f_D = \frac{2\pi kh}{\beta L(2kh + \sinh 2kh)} \frac{1}{h} \quad (\text{A.4})$$

すなわち、減衰関数は水深 h に逆比例する。

実際の波浪現象では、海底境界層は乱流であり、以上の誘導結果は適用できない。乱流境界層のエネルギー逸散率は、次のように導かれている¹⁴⁾。

$$\bar{E}_f = \frac{2}{3\pi} \rho f_w \frac{a^3 \sigma^3}{\sinh^3 kh} \quad (\text{A.5})$$

ここに、 f_w は摩擦係数である。この式を分散関係式を用いて書き直すと、次のようになる。

$$\bar{E}_f = \frac{2}{3\pi} \frac{\rho g f_w k a^3 \sigma}{\cosh kh \sinh^2 kh} \quad (\text{A.6})$$

このエネルギー逸散率を用いて水深一定の場における振幅減衰の微分方程式を導くと、若干の演算によって次の結果が得られる。

$$\frac{da}{dx} = -\frac{4}{3\pi} f_w \frac{k^2 h^2}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} \frac{a^2}{h^2} \quad (\text{A.7})$$

すなわち、振幅の減少率は振幅の2乗に比例する。式(1)の放物型方程式では減衰項が振幅に比例する形であるため、その摩擦減衰係数 f_{Df} は次のように表示される。

$$f_{Df} = \frac{4}{3\pi} f_w \frac{a}{h^2} \frac{k^2 h^2}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} \quad (\text{A.8})$$

人工リーフ天端上では水深が小さいので、 $kh \rightarrow 0$ の極限值を考えると、減衰係数 f_{Df} は次のように簡略化される。

$$f_{Df} = \frac{1}{3\pi} f_w \frac{a}{h^2} \quad (\text{A.9})$$

ここで問題となるのが摩擦係数 f_w の値である。乱流境界層の摩擦係数は、レイノルズ数が十分に大きければ一定値となり、その値は底面の相当粗度 k_s と底面における水粒子の軌道振幅 a_m の比によって定まる。その定式化としてはSwart (1974)による次式が挙げられている^{15), 16)}。

$$f_w = \exp[-5.977 + 5.213(k_s/a_m)^{0.194}] \quad (\text{A.10})$$

ただし、 $k_s/a_m > 0.64$ では $f_w = 0.30$ を上限値とする。相当粗度については、砂漣存在下では砂漣波高の3倍を取るとされている¹⁶⁾。

しかしながら、人工リーフの表面のように粗石あるいは異形コンクリートブロックで覆われている場合の摩擦係数については知見が得られていない。したがって本数値モデルを実際問題に適用する際には、人工リーフを設置した現地の波浪観測あるいは模型寸法が十分に大きくて縮尺効果の影響のない室内実験データを用いたキャリブレーションを行い、その結果に基づいて摩擦係数 f_w の値を定めることが望ましい。

(以上)