

# 低天端型人工リーフの透過特性

## WAVE TRANSMISSION CHARACTERISTICS BEHIND LOW-CROWN-HEIGHT TYPE ARTIFICIAL REEF

井田康夫<sup>1</sup>・矢野嘉章<sup>2</sup>・榎本明子<sup>3</sup>

Yasuo IDA, Yoshiaki YANO and Akiko KASHIMOTO

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪工業大学助教授 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)日本港湾コンサルタント 関西支社 (〒651-0084 神戸市中央区磯辺通り 3-1-2 第三建大ビルディング 10F)

<sup>3</sup>学生会員 大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

This paper presents the result of hydraulic model experiments on the coefficients of wave transmission over a low-crown-height type artificial reef which is made of wave dissipating concrete blocks. The ratio between the depth from water surface to the top of the submerged reef and the incident wave height,  $R/H_1$ , varies from 0.79 to 8.75. The relative width of the reef against wave length,  $B/L$  has a variation from 0.51 to 2.53. The wave-breaking limit,  $R/H_1$ , lies between 0.8 and 1.3 for the above structure. The transmission coefficient,  $K_T$ , decreases following an increase in  $B/L$ . The change of  $K_T$  is small for a range of  $B/L$  larger than 1.6. With regard to the relationship between the ratio of wave height over block scale,  $H_1/d'$ , and  $K_T$ ,  $K_T$  decreases slightly parallel with increase in  $H_1/d'$ , being proportional to increase in  $B/L$ . There is no significant relationship identified between Reynolds number,  $Re$ , and  $K_T$ . Based on the above results, an empirical formula to assess  $K_T$  is proposed, employing  $B/L$  as a parameter.

**Key Words :** artificial reef, transmission coefficient, Reynolds number, block scale

### 1. 緒言

わが国の砂浜海岸の侵食量は年間160ヘクタール程度にもおよぶことから、海岸侵食は社会的にも工学的にも依然大きな問題であり、海浜の安定化が強く求められている。

海浜の安定化および侵食対策工法として離岸堤は大いに普及し、その機能を発揮したが、近年の海岸環境への配慮、中でも景観重視の立場から人工リーフの建設事例が多くなっており、海岸統計(平成13年度版)によれば過去約20年で711基にも達している。

人工リーフの設置目的は(1)高潮対策事業、(2)侵食対策事業、(3)海岸環境整備事業に分類され、強制砕波、表面摩擦および透過抵抗による波浪減衰および侵食防止機能に加え、海浜景観の維持・向上、水質の維持・改善、海洋性レクリエーション水域の創出および生態系の維持・確保などソフト面の重要な機能を有している。

このように人工リーフは優れた工法であるが、その実態についての系統的な資料に乏しかった。国土交通省による直近130件の調査(野口ら, 2002)<sup>1)</sup>および

著者らの独自調査(都道府県へのアンケート調査により150件収集, 2002)によれば既設の人工リーフは次のような特徴を持つことが分った。

- ①入射波の波形勾配は0.02~0.04の範囲で、構造物は砕波帯内に設置されている。
- ②消波効果は強制砕波よりも、砕波後の透過中のエネルギー逸散により発揮される。
- ③構造形式は「被覆ブロック+中詰石」形式が多く、消波ブロックのみを用いたものは数%である。
- ④3基以上の群堤として設置されている場合がほぼ半数を占める。

しかし、このような人工リーフについても海岸保全施設として波浪減衰効果に関して検討すべき課題もまだ残されている。人工リーフの天端水深は多くの場合、設計波の砕波を意識して決定されるが、この天端水深を大きくして低天端化し、天端幅の増大によって目標とする透過波高を達成すれば、

- ①小型船舶の航行安全性が高められる。
  - ②被覆ブロックおよび石材が軽量化できる。
  - ③自然地形への影響を少なくできる。
- などの利点が考えられる。

そこで本論文では既設の人工リーフの建設条件、特に天端水深と天端幅について一定の検討を行った後、砕波領域に加えて従来あまり検討されていない非砕波領域も対象にして、相対堤体幅を最大 2.5 程度まで拡張して波浪減衰効果を明らかにする。

そして相対天端水深、相対堤体幅に関係して砕波限界を示すと共に、著者らが既に指摘している<sup>2)</sup>離岸堤などのような天端が平均海面上にある透過性構造物において、透過率が2つの無次元量、すなわち入射波高/空隙代表径ならびに粒径レイノルズ数に支配されることに関連し、本論のような透過性構造物が平均海水面下にある場合の透過率とこれらの無次元量の動向についても検討する。

なお、実験断面は将来における良質な石材の入手難および既設消波ブロックの人工リーフへの転用等を考慮し、消波ブロックのみを用いて構築した。

## 2. 人工リーフの現状

海岸の保全を図る上で基本的な防護方式が線的防護から面的防護に移行し、かつ改正海岸法に見られるように人工リーフは従来の侵食対策、高潮対策に加え海岸環境整備をも目的として数多く施工されている。

図-1は、著者らの調査によるもので、人工リーフの建設事例(施工済、施工中および計画段階含む)を海域別に事業目的と基数を示したものである。整理にあたり、人工リーフの主な設置目的が水産協調および魚礁効果を期待している場合を海岸環境整備としている。

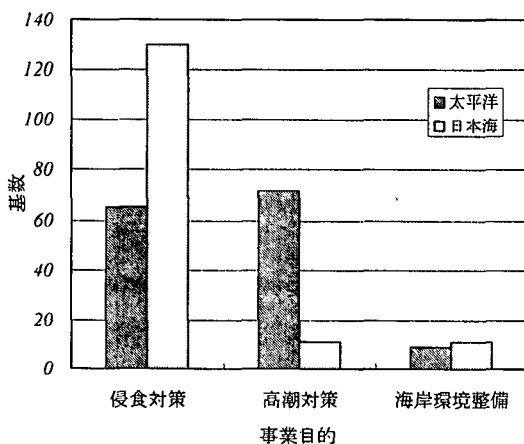


図-1 基数と海域

図より、人工リーフは多くの場合、侵食対策および高潮対策として用いられており、海岸環境整備のみの利用は少ないようである。また、海域別にみると日本海側は明らかに海浜の安定化のために人工リーフを設置している。太平洋側においては、人工リーフを侵食対策として用いている事例も多いが、日本海側とは異なり高潮対策

としても用いられている。

人工リーフの構造形式に関しては、コア材として捨石、被覆材として被覆ブロックを用いている事例が多い。またコア材の捨石の重量は10~500kgが多く、被覆材重量は2~25t程度を使用している。なお、コスト低減のため既設離岸堤の消波ブロックを人工リーフに転用した事例は現在のところ数少ない。

一般的に波浪を減衰させる上で重要な人工リーフの諸元は天端水深と堤体幅とされている。これは人工リーフに要求される機能が、波を高波浪時に砕波させ、透過抵抗および表面摩擦によって波浪を減衰させるためである。このような波浪減衰効果は2つの無次元量、すなわち天端水深 ( $R$ ) と入射波高 ( $H_i$ ) の比である相対天端水深 ( $R/H_i$ ) と、堤体幅 ( $B$ ) と波長 ( $L$ ) の比である相対堤体幅 ( $B/L$ ) に支配されることは明らかである。そこで、海岸特性の異なる150件の人工リーフを対象に  $R/H_i$  と  $B/L$  の実態を把握することとした。2つの相対量の算出に際し、波高は天端水深や堤体幅を決定するために用いた設計波高とし、波長は設置位置における値を用いた。そして  $R/H_i$  と  $B/L$  を算出し、両者の関係を示したものが図-2である。天端水深 ( $R$ ) は、既往最高潮位 (H.H.W.L.)、朔望平均満潮位 (H.W.L.) および朔望平均干潮位 (L.W.L.) を用いた。図中、同じ記号の上位の値はH.H.W.L.時、中間の値はH.W.L.時、下位の値はL.W.L.時を表わしている。なお  $R/H_i$  がマイナス値であるものは海面上に天端が出ていることを表わす。

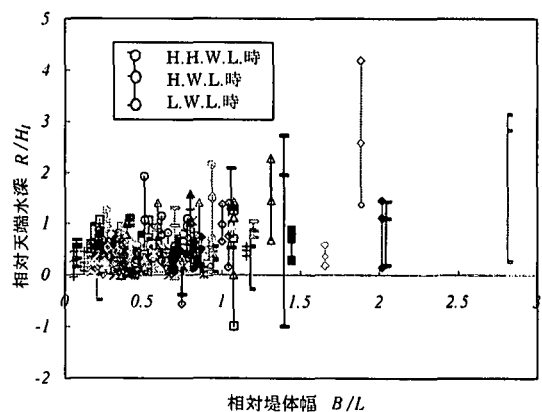


図-2 相対天端水深と相対堤体幅

図より、 $R/H_i$  はH.H.W.L.時では0.13~4.17の範囲にあり、H.W.L.時では0.00~2.81、L.W.L.時では-1.01~1.38の範囲にある。 $B/L$ については0.06~2.81の広範囲に設定されている。しかし、ほとんどの事例は  $R/H_i$  がH.W.L.時で0.1~1.0程度に、そして  $B/L$  は0.2~1.0程度に設定されている。また、 $R/H_i$  と  $B/L$  はほぼ線形関係にあり、 $R/H_i$  が大きくなるほど、 $B/L$  は大きくなっていることがわかる。

以上、現状では  $R/H_i < 1.0$  が多く、強制砕波と透過中のエネルギー逸散によって波浪低減効果を期待している

ことがうかがえる。しかし、天端水深に関しては設計上小型船舶の吃水は考慮しているものの船舶の安全性という視点から見ると、実際砕波が起こっている海面上では安全性が高いとは言いがたく、アンケートの回答の中でも問題点として指摘されている事例があった。

### 3. 実験概要

#### (1) 実験装置と方法

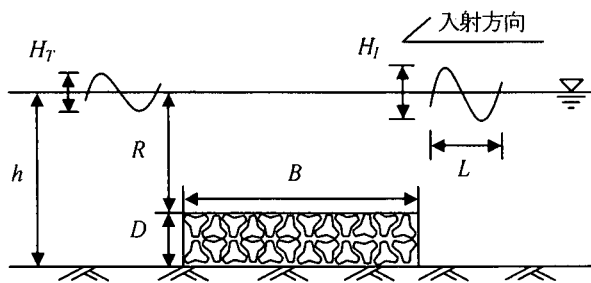


図-3 実験断面

実験は長さ 50m、高さ 1.2m、幅 0.8m の 2次元造波水槽で行い、水槽の中央付近に図-3に示すような水平積形式でテトラポッド模型を設置し、砕波および非砕波条件で所定の入射波を作用させて透過率を求めた。透過波高は堤体後面から常に 4m 離れた位置で容量式波高計により測定し、入射波高は無堤時における同位置の波高とした。なお各ケースとも 3回づつ波高を計測し、平均値を用いて透過率を算出した。

#### (2) 実験の種類

実験に用いた入射波はすべて規則波とし、水深  $h=45\sim 55\text{cm}$ 、波高  $H_i=4.00\sim 15.52\text{cm}$ 、波長  $L=224\sim 472\text{cm}$  の範囲にある 5 7種類の波を作用させた。

堤体に使用したテトラポッド模型は 4種類であり、それぞれのブロック高さ  $d$  は 4.5, 7.2, 12.2 および 18.9cm ( $d'$  は 3.66, 5.80, 9.93 および 15.27cm) である。堤体幅  $B$  は 240~750cm で、天端水深  $R$  は 11~35cm の範囲で変化させ、堤高  $D$  は 20 および 37cm とした。ここで、空隙代表径  $d'$  とはブロック 1 個の体積と同体積の球の直径を表したもので、空隙の代表長さの一種である。

入射波の特性としては、相対水深  $h/L$  が 0.104~0.232、波形勾配  $H_i/L$  が 0.011~0.036 である。構造物および入射波の相対的な特性は、波高・空隙代表径比  $H_i/d'=0.26\sim 4.24$ 、粒径レイノルズ数  $Re=3700\sim 63200$ 、相対堤体幅  $B/L=0.51\sim 2.53$  である。また、相対天端水深  $R/H_i$  は砕波領域も含む 0.79~8.75 の十分な領域に設定した。また、相対堤体幅  $B/L$  については天端水深の増大にともなう透過率の変化を広く把握するため  $B/L=2.53$  まで設定した。ここで粒径レイノルズ数は  $Re=u\cdot d'/\nu$  ( $u$ : 入射

波の水平最大水粒子速度、 $\nu$ : 水の動粘性係数 [ $0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ ]) である。

なお、入射波および構造物の詳細を表-1および表-2に示す。

表-1 入射波の諸元

水深 $h$ (cm)	45, 48, 50, 54, 55
入射波高 $H_i$ (cm)	4.00~15.52
周期 $T$ (sec)	1.30~2.20
波長 $L$ (cm)	224~472
相対水深 $h/L$	0.104~0.232
波形勾配 $H_i/L$	0.011~0.036
波の種類	57

表-2 構造物の諸元

ブロック高 $d$ (cm)	4.5	7.2	12.2	18.9
空隙代表径 $d'$ (cm)	3.66	5.80	9.93	15.27
堤体幅 $B$ (cm)	240, 250, 360, 480, 500, 550, 600, 750			
天端水深 $R$ (cm)	11, 17, 25, 30, 35			
堤高 $D$ (cm)	20, 37			
波高・空隙代表径比 $H_i/d'$	0.26~4.24			
相対堤体幅 $B/L$	0.51~2.53			
粒径レイノルズ数 $Re$	3700~63200			
相対天端水深 $R/H_i$	0.79~8.75			

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 砕波限界

図-4は砕波限界を知るため、目視観測によって堤体上で砕波、非砕波を判定し、その結果を縦軸に相対天端水深 ( $R/H_i$ )、横軸に相対堤体幅 ( $B/L$ ) をとって示したものである。

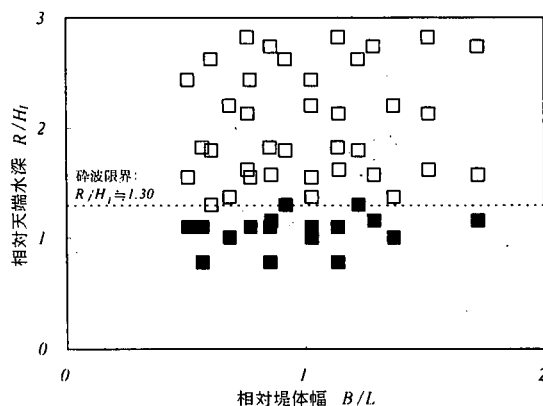


図-4 砕波限界

図より全断面消波ブロック型 (テトラポッド) 人工リーフの砕波限界は  $R/H_i \approx 1.3$  である。また、 $B/L$  が砕波限界におよぼす影響はあまり大きくない。なお、この結

果は樁木・出口らによる捨石型人工リーフ（一部テトラポッド使用）の碎波限界  $R/H_1 = 1.6 \sim 1.8$  よりも小さい結果となっている。これは本実験の場合、全断面が消波ブロックであり捨石とは構造特性が異なるためと思われる。

### (2) 透過率と相対天端水深の関係

図-5は透過率 ( $K_T$ ) と相対天端水深 ( $R/H_1$ ) の関係を示したもので、 $Re$  と  $H_1/d'$  を固定し、パラメータを  $B/L$  にしたものである。図中の実線は各条件における実験値を最小二乗法により代表させたものである。

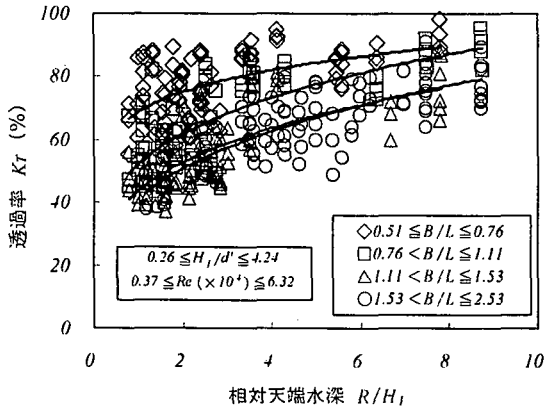


図-5 透過率と相対天端水深

図より、 $R/H_1$  の増加に伴って  $K_T$  は明らかに増大しており、透過率におよぼす  $R/H_1$  の重要性を示している。また、 $R/H_1$  が同じ場合は  $B/L$  が大きいほど  $K_T$  は小さくなることが認められる。

### (3) 透過率と相対堤体幅の関係

透過率に対する堤体幅の影響を明らかにするために、両者の関係を示したものが図-6で、 $Re$  と  $H_1/d'$  を固定し、パラメータは  $R/H_1$  である。図中の実線は図-5と同様、各実験値を最小二乗法で表わしたものである。

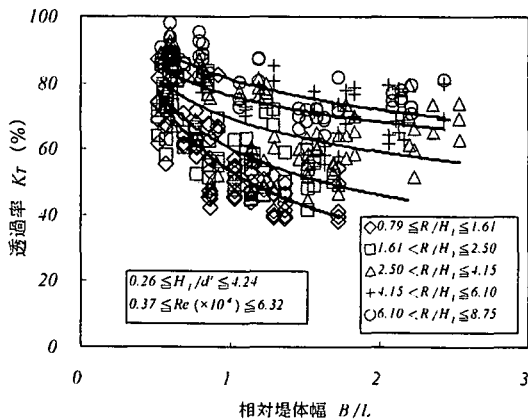


図-6 透過率と相対堤体幅

図より、 $B/L$  の増加に伴って  $K_T$  は明らかに減少し、 $B/L < 1.6$  において  $K_T$  の減少の割合は大きい。そして  $B/L =$

$1.6$  より大きくなると  $K_T$  の変化の割合は小さいことがわかる。また  $B/L$  が一定の場合では  $R/H_1$  が小さいほど  $K_T$  も小さくなる傾向がある。

このように碎波の有無にかかわらず  $R/H_1 = 0.79 \sim 8.75$  の領域において、 $R/H_1$  の値によって、所要の透過率に対する  $B/L$  の値がそれぞれ存在することが明らかになった。

### (4) 透過率と波高・空隙代表径比の関係

図-7および図-8は透過率 ( $K_T$ ) と波高・空隙代表径比 ( $H_1/d'$ ) の関係を示したもので、 $Re$  と  $B/L$  を固定し、パラメータを  $R/H_1$  にしたものである。ただし、それぞれの図において  $B/L$  は  $0.51 \leq B/L \leq 0.79$  および  $1.28 < B/L \leq 2.23$  であり、固定している範囲が異なっている。

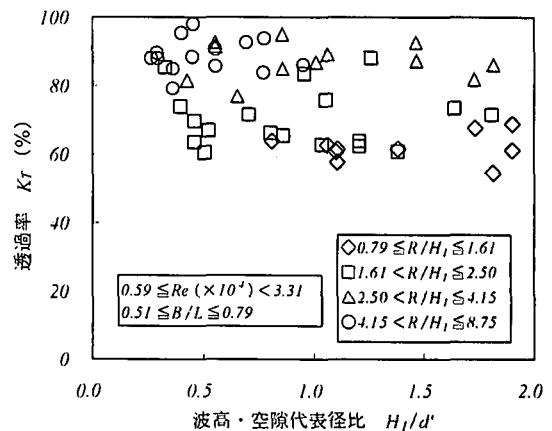


図-7 透過率と波高・空隙代表径比 ( $0.51 \leq B/L \leq 0.79$ )

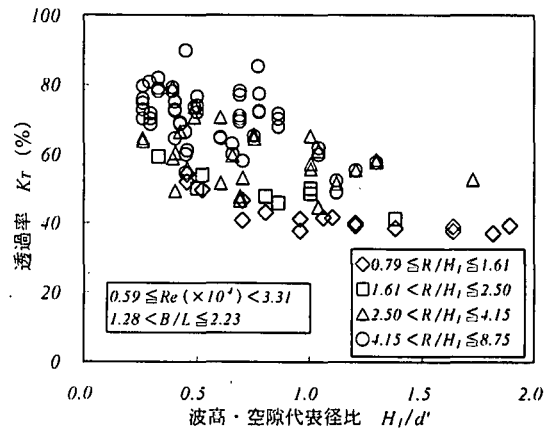


図-8 透過率と波高・空隙代表径比 ( $1.28 < B/L \leq 2.23$ )

まず、図-7 ( $0.51 \leq B/L \leq 0.79$ ) の場合、 $H_1/d'$  と  $K_T$  の間には明確な関係は認められない。しかし、 $B/L$  の大きい図-8 ( $1.28 < B/L \leq 2.23$ ) の場合は、 $H_1/d'$  の増加に伴う  $K_T$  の減少傾向が明らかに認められる。これは、図-7の場合図-6で示しているように  $B/L$  が  $K_T$  におよぼす影響が支配的であり、その結果  $H_1/d'$  と  $K_T$  の明確な関係は認められない。一方、図-8のように  $B/L$  の領域が大きい場合は  $B/L$  の  $K_T$  におよぼす影響が支配的ではなく、その結果  $H_1/d'$  が  $K_T$  におよぼす影響が表われたも

のと考えられる。  $H_1/d'$  が  $K_T$  におよぼす効果は、直立堤（非越波）の場合、  $H_1/d'$  の増加に伴って  $K_T$  の減少の程度が大きい。しかし、人工リーフは水面下に透過性構造物があり、構造物内部の流体運動の規模は小さいものとなっている。したがって構造物内部の流体運動を表現する指標の1つである  $H_1/d'$  が  $K_T$  におよぼす効果は大きく表われていない。

### (5) 透過率と粒径レイノルズ数の関係

図-9および図-10は透過率 ( $K_T$ ) と粒径レイノルズ数 ( $Re$ ) の関係を示したもので、  $R/H_1$  と  $B/L$  を固定し、パラメータを  $H_1/d'$  にしたものである。ただし、それぞれの図において  $B/L$  は  $0.51 \leq B/L < 0.79$  および  $1.28 < B/L \leq 2.23$  であり、固定している範囲が異なっている。これらの図より  $R/H_1$  と  $B/L$  の値にかかわらず  $K_T$  と  $Re$  の明確な関係は認められない。しかし、図-9と図-10を比較すると前述のように  $B/L$  の増加に伴って  $K_T$  は明らかに減少し、  $R/H_1$  の増加に伴って  $K_T$  は増加している。なお、  $Re$  と  $K_T$  の関係は、天端水深が小さくなり、離岸堤のような直立型の透過性構造物に近付くほど密接となり、粘性の効果が表われる。このため人工リーフのような構造物で天端水深が大きい場合は、  $Re$  が  $K_T$  におよぼす効果は小さくなる。

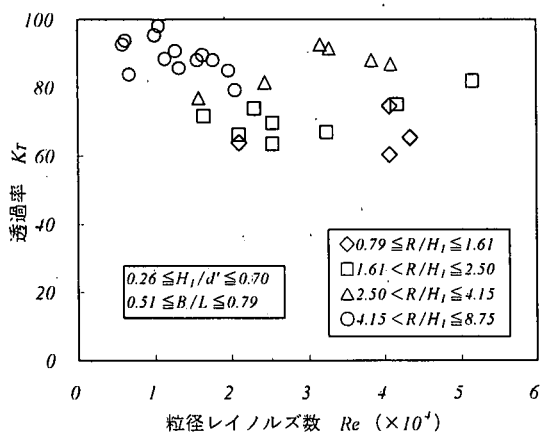


図-9 透過率と粒径レイノルズ数 ( $0.51 \leq B/L \leq 0.79$ )

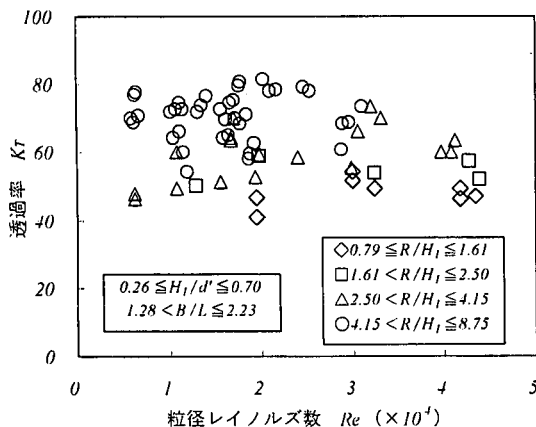


図-10 透過率と粒径レイノルズ数 ( $1.28 < B/L \leq 2.23$ )

### (6) 実験式の提示

実験結果から透過率 ( $K_T$ ) は相対天端水深 ( $R/H_1$ ) および相対堤体幅 ( $B/L$ ) が大きく関係することが明らかになった。そこでこれらの要因を含む透過率の実験式を検討するにあたり、まず碎波限界を示す  $R/H_1$  によって碎波と非碎波を区別し、次に  $K_T$  の分布範囲が異なることから  $R/H_1$  実験値の範囲を区分した。

実験式の関数形は実験値の分布傾向から判断して  $B/L$  を変数として式(1)のように仮定し、  $R/H_1$  のグループごとに式中の  $a$ ,  $b$  を最小二乗法で求めた。この結果、得られた式中の係数  $a$ ,  $b$  を表-3に示す。

$$K_T = a(B/L)^b \quad (1)$$

表-3 実験式の係数

		$a$	$b$
碎波	$0.79 \leq R/H_1 \leq 1.30$	54.094	-0.6683
	$1.30 < R/H_1 \leq 1.80$	52.176	-0.5188
非碎波	$1.80 < R/H_1 \leq 2.40$	56.375	-0.5363
	$2.40 < R/H_1 \leq 2.82$	57.837	-0.3219
	$2.82 < R/H_1 \leq 3.57$	74.460	-0.3066
	$3.57 < R/H_1 \leq 4.30$	77.345	-0.3260
	$4.30 < R/H_1 \leq 6.40$	76.600	-0.1798
	$6.40 < R/H_1 \leq 8.75$	83.200	-0.2076

図-11はこのようにして得られた実験式による計算値と実験値を対比したものである。

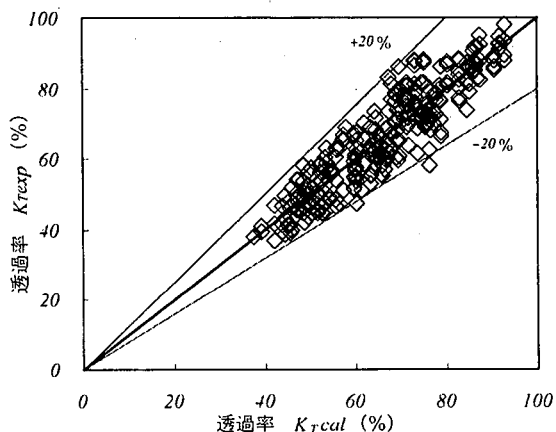


図-11 透過率の実験値と計算値

図より実験値と計算値はおおむね良い一致を示し、  $\pm 20\%$  以内に総数の96%が存在する。このことより実験式は低天端の全断面消波ブロック型人工リーフによる波浪変形の予測において、ある程度の精度をもって使用できるものと考えられる。

## 4. 結言

人工リーフによる海岸整備は、離岸堤などの従来の整

備手法に比べ、ソフトに波浪を減衰させ、また海水交換機能および親水性にも優れた構造物であるので、今後も沿岸域に建設されることが多くなるであろう。それらの人工リーフの計画・設計に際し重要な相対天端水深 ( $R/H_t$ ) および相対堤体幅 ( $B/L$ ) の関係を全国各地に施工・計画されている150件の人工リーフを対象に検討した結果、人工リーフの現状は、おおむね  $R/H_t < 1.0$ 、 $B/L < 1.0$  の条件下にある。今後、海岸域の有効利用を図っていく中で天端水深の増深、それに伴う堤体幅の延長も視野に入れておく必要があると思われる。そこで本論では、従来研究対象とされていなかった天端水深が大きい場合における人工リーフの透過特性の基礎実験を  $R/H_t=0.79\sim 8.75$ 、 $B/L=0.51\sim 2.53$  の広範囲に行い、以下の結果を得た。

①天端水深が大きい場合における人工リーフの透過率 ( $K_T$ ) は相対天端水深 ( $R/H_t$ ) と相対堤体幅 ( $B/L$ ) に支配される。

② $R/H_t$  の増加に伴って  $K_T$  は明らかに増加する。また  $R/H_t$  が同じ場合、 $B/L$  が大きいほど  $K_T$  は小さくなる傾向がある。

③ $B/L$  の増加に伴って  $K_T$  は明らかに減少し、 $B/L \approx 1.6$  より大きくなると  $K_T$  の減少割合は小さい。また  $B/L$  が同じ場合、 $R/H_t$  が小さいほど  $K_T$  は小さくなる傾向がある。

このように  $R/H_t=0.79\sim 8.75$  の領域において、 $R/H_t$  の値によって、所要の透過率に対応する  $B/L$  の値が存在することが明らかになった。

④ $Re$  と  $B/L$  を固定し、 $H_t/d'$  と  $K_T$  の関係を見ると、 $B/L$  が小さい時、 $H_t/d'$  と  $K_T$  の関係はあまり明確には認められないが、 $B/L$  が大きくなると  $H_t/d'$  の増加に伴って  $K_T$  はわずかに減少する。

⑤ $R/H_t$  と  $B/L$  の値にかかわらず、 $K_T$  と  $Re$  の間に明瞭な関係は認められない。

⑥天端水深の大きい人工リーフの場合には非越波の直立堤と比べ、水面下に透過性構造物があるので構造物内部の流体運動の規模が小さく、 $H_t/d'$  および  $Re$  が  $K_T$  におよぼす影響は小さい。

⑦実験値の分布傾向から  $B/L$  を変数とした低天端型人工リーフの透過率の実験式を得た。

$$K_T = a(B/L)^b$$

この実験式による計算値は総数の96%が±20%の差で実験値と一致する。

#### 参考文献

- 1) 野口賢二・鳥居謙一・人見寿・笛田俊治・丸山準・岸田弘之・山崎真嗣：人工リーフと緩傾斜堤に関する平成13年全国実態調査，海岸工学論文集，土木学会，第49巻(2)，pp.921-925，2002。
- 2) 榎木亨・井田康夫・後野正雄・菅智浩：透過性構造物による波変形の模型実験の限界について，海岸工学論文集，土木学会，第39巻(2)，pp.616-620，1992。
- 3) 国土交通省河川局編：海岸統計（平成13年度版），261p，2001。
- 4) 建設省河川局海岸課：人工リーフの設計の手引き，(社)全国海岸協会，94p，1992。
- 5) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久：人工リーフの機能と設計法，土木研究所資料，第2696号，79p，1988a。
- 6) 榎木亨・出口一郎・岡原義典：幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について，海岸工学論文集，土木学会，第36巻，pp.633-637，1989。
- 7) 井田康夫・矢野嘉章・榎本明子：天端上水深の大きい人工リーフ型構造物の透過特性，海洋開発論文集，土木学会，vol.18，pp.335-340，2002。