

複列配置の低天端型人工リーフ に関する透過特性

WAVE TRANSMISSION CHARACTERISTICS BEHIND DOUBLE LOW-CREST ARTIFICIAL REEF

井田康夫¹・檜本明子²
Yasuo IDA and Akiko KASHIMOTO

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

²正会員 工修 日本海洋コンサルタント(株) 本社 (〒136-0074 東京都江東区東砂 7-19-31 東京日産江東ビル 3F)

This paper presents the results of examination on wave transmission over a low-crest artificial double reef which is made of wave dissipating concrete blocks. In the experiment, the ratio of the submerged depth of crown of reef to the incident wave height, R/H_i , was set in the range of 1.10 to 4.98. The relative width of the reef against wave length, $(B_1+B_2)/L$ varies from 0.76 to 2.16. The relative spacing of the structures against wave length, l/L has a variation form 0.23 to 1.30. In the case of total width of double reef, $B' (=B_1+l+B_2)$ is equal to width of single reef, B_0 , K_T of double reef is almost equal to K_T of single reef. K_T decreases following an increase in B/L , and K_T becomes the minimum value in the case of $l/L=0.23$ or 1.10.

Key Words : artificial reef, transmission coefficient, Reynolds number

1. 緒言

わが国は、国土面積に対して海岸線の形状が極めて複雑で、その延長が非常に長いことが特徴である。また地形と季節の変化に富んでおり、台風ならびに冬季季節風による高潮、高波浪、梅雨時の集中豪雨、地震に伴う津波など自然災害の多い国である。しかし沿岸域は経済、産業、情報の基盤であるため、利用価値は非常に高い。このため第六次海岸整備七箇年事業からは防護、利用、環境の面から海岸整備が行われ、その一環として今日まで700基以上の人工リーフが建設されている。

これらの人工リーフの主な設置目的は高潮対策、侵食対策、海岸環境整備に分類され、これによる波浪減衰は水深の急変に伴う強制砕波と堤体の透過抵抗によるエネルギー逸散によるものである。そしてこの工法は好適な藻場を形成することができることから漁礁効果が期待されるとともに、海洋性レクリエーションの水域の確保および海浜景観の保持が可能である。このような人工リーフは、一般的に砕波帯より沖側に設置されることから、基礎地盤となる海底地形も比較的変動が少なく安定しており、天端が水面下にあるため被覆ブロックや中詰石な

どの安定性も離岸堤や突堤などに比べて優れている。このように人工リーフは、今後の良好な海岸環境を維持、創出する立場からも、その効果を大いに期待されるものである。

著者らは2002年度に全国の都道府県を対象に行なった独自のアンケート調査により、多数の人工リーフは相対天端水深(R/H_i)を0.1~1.0程度の範囲に、また相対堤体幅(B/L)を0.2~1.0程度の範囲に設定されており、事業者が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を明らかにした。しかし天端で砕波が生じるような条件下では、小型船舶の航行に対する安全性は充分とは言いがたい。その上波力に耐え得る石材や被覆ブロックの重量が要求される。このため天端水深をやや大きくした低天端型人工リーフの開発を試み、その透過特性について明らかにし、実験式を示した¹⁾。この場合、通常の波浪は砕波による波浪減衰は期待できないため目標透過率を得るには、透過抵抗を増大させなければならず広い堤体幅が必要となる。その結果として大断面構造となることから、次の諸点が問題となる。

①海底の広い範囲を堤体で覆うこととなり、漁場の減少や消失につながることから、漁業関係者からの理解が

得られにくい。

- ②大規模な建設機械が必要となり建設コストが割高になる。
- ③堤体材料の割石・捨石を多量に確保することが困難となる。
- ④人工リーフに期待される機能を十分に発揮し、海藻が繁茂し、集魚効果を得るまでには長期間を要する。

このように人工リーフは多くの機能を備える一方、解決すべき点も残されている。一方、将来の海岸整備を考える上で既設の人工リーフに対する調査・分析も極めて重要と思われるが平面、断面の決定要因や設置後の効果についてほとんど明らかにされていない。

そこで本論文では、まずアンケートの回答結果を基に、事業者が人工リーフの計画・設計の際、どのような点に配慮して平面、断面を決定しているのか、また設置後の効果をどのように評価しているのかを明らかにする。そしてこれらの検討結果から、人工リーフの断面形と透過特性について明らかにする。以下に用いる用語は低天端型の人工リーフの堤体幅を2分割し、中央に遊水部のある人工リーフを複堤と称し、これに対し遊水部がない人工リーフを単堤と呼ぶこととする。また複堤において遊水部を含まない堤体幅を実質堤体幅とし、遊水部を含む堤体幅を見掛けの堤体幅とする。実験は透過率 (K_T) を計測し、1基のみすなわち単堤の堤体幅 (B_0) と、2基並べたときすなわち複堤の実質堤体幅 ($B=B_1+B_2$) が同じ場合 ($B_0=B$) の K_T の比較を行なう。次に単堤の堤体幅 (B_0) と、複堤の遊水部幅 (l) も含む堤体幅の合計すなわち見掛けの堤体幅 ($B'=B_1+l+B_2$) が同じ場合 ($B_0=B'$) の K_T の比較を行なう。そして相対遊水部幅 (l/L) [L は波長] が K_T に及ぼす効果を明らかにした上で、 K_T と相対堤体幅 (B/L) の関係について考察し、複列配置の低天端型人工リーフの有効性について論議するものである。

2. 既設人工リーフの計画決定要因とその効果

既設の人工リーフにおいて 2002 年度に都道府県の事業担当者にアンケートを行ない、36 都道府県から 150 件 397 基の人工リーフなどについて海岸性状、波浪特性、構造物の断面およびその効果などの回答を得た。

(1) 配置方法とその決定要因

回答結果から 1ヶ所当たりの人工リーフの基数の割合を調べたところ、全体で 118ヶ所のうち、単堤堤が 28.8% で最も多く、これに続いて群堤 (2基) の 19.5%、群堤 (3基) の 16.1%が多い。国土交通省による 130 件の調査 (野口ら, 2002) ²⁾ も同様の結果を示している。

図-1 は人工リーフの配置方法がどのような要因で決められたのか単堤、連続堤、群堤に分けて決定要因を

示したものである。図より人工リーフの配置方法の決定根拠は海浜安定に最も配慮されており、次に海面利用および自然環境保全に留意されていることが分かる。このことから人工リーフによる海岸整備は防護、環境整備、利用の各面から取り組まれていることが明らかである。

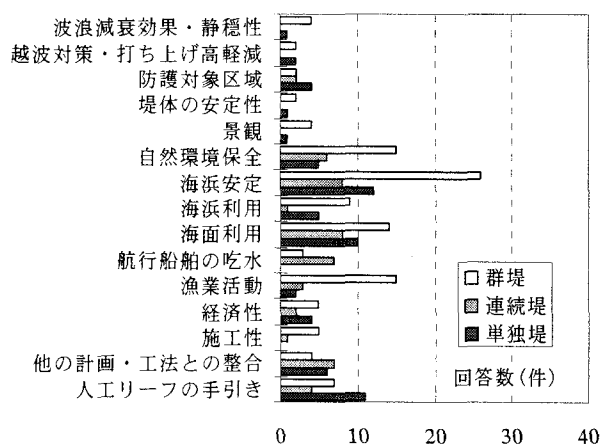


図-1 人工リーフの配置方法の決定要因

(2) 天端高と堤体幅の決定要因

一般的に波浪を減衰させる上で特に重要な人工リーフの諸元は天端水深と堤体幅である。諸般の事情から天端水深が決定されると直ちに天端高は決まる。続いて目標透過率を達成するために必要な堤体幅が決定される。図-2 はこのように決定される天端高と堤体幅を決定するに至った根拠を示すものである。

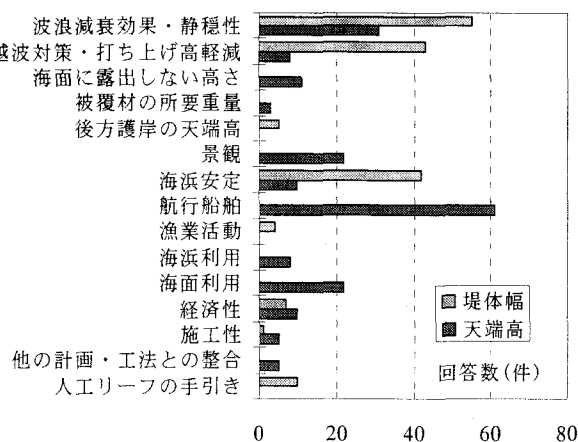


図-2 天端高と堤体幅の決定要因

図より天端高の決定要因は航行船舶の吃水、波浪減衰効果・静穏性であることが明白である。また堤体幅の決定要因は波浪減衰効果・静穏性、越波対策・打ち上げ高の軽減、海浜安定によるものである。以上のことより人工リーフの断面は、背後地の安全性を第一に考え、波を高波浪時に碎波させ、透過抵抗によって波浪を減衰させ

て、目標透過率を達成できるように考慮して決められている。また小型船舶の吃水にも配慮されている状況が分かる。

(3) 人工リーフ設置後の効果と問題点

図-3 は、人工リーフの設置後の効果を示したものである。

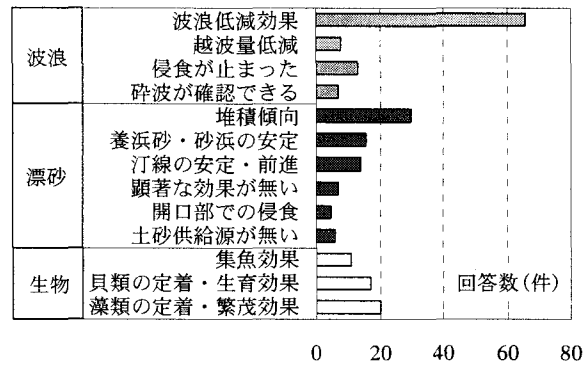


図-3 人工リーフ設置後の効果

図より波浪低減効果が顕著に認められ、海浜が安定していることから人工リーフは高潮対策、侵食対策に非常に有効な構造物であることが改めて明らかとなった。また漁礁効果があることも確認されている。しかし人工リーフの開口部の侵食も認められておりこれは今後、取り組むべき課題の一つである。

図-4 は人工リーフ設置に関する問題点を示したものである。

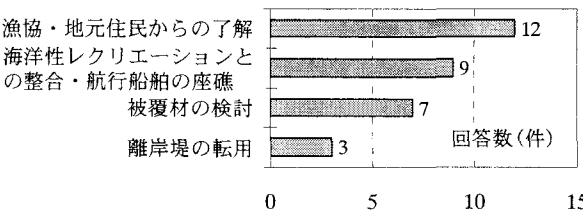


図-4 人工リーフ設置に関する問題点

図より各事業担当者が最も苦慮している点は、漁業関係者・地元住民から了解を得ることである。理由として①漁場の減少・消失、小型船舶の座礁に対する不安が、十分に払拭できないこと。②背後地の安全性から目に見えて効果のある離岸堤を好む場合と、良好な景観の保持という相反する問題点が混在すること。が挙げられる。また計画・設計段階では①工期が長く施工中に周辺環境が変化することから、被覆材の材料・重量の検討が難しいこと。②既存離岸堤の材料の有効活用を図ること。

に苦慮することが挙げられた。
以上のことから人工リーフは、多機能で優れた構造物であるとともにいくつかの問題点も残されていることが明らかとなった。

3. 複列配置の人工リーフの透過率実験

3. 1 実験方法と実験条件

実験は長さ 50m、高さ 1.2m、幅 0.8m の 2 次元造波水槽に、図-5 のように全断面テトラポッド模型を用いた低天端型人工リーフ模型を設置し、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 回ずつ波高を計測し、平均値を用いて透過率を算出している。

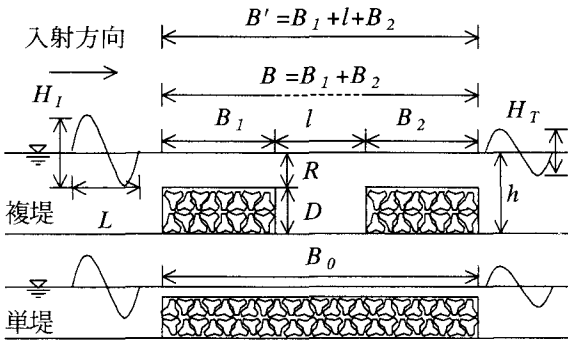


図-5 実験断面

実験に用いた入射波はすべて規則波とし、相対天端水深 $R/H_1=1.10\sim4.98$ 、相対堤体幅 $(B_1+B_2)/L=0.70\sim2.16$ 、相対遊水部幅 $l/L=0.23\sim1.30$ の範囲で透過率を計測した。なお空隙代表径 (d') は空隙率 50% の場合におけるテトラポッド 1 個分の体積と同体積の球径で $d'=5.8\sim15.3$ の 3 種類を用いた。また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, ν : 水の動粘性係数 $[0.01\text{cm}^2/\text{s}]$) である。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)	46, 50
入射波高	H_1 (cm)	4.02~15.57
周期	T (s)	1.3~2.1
波長	L (cm)	231~429
相対水深	h/L	0.117~0.216
波形勾配	H_1/L	0.011~0.037
波の個数		18

表-2 構造物の諸元

ブロック高	d (cm)	7.2, 12.2, 18.9
空隙代表径	d' (cm)	5.80, 9.93, 15.27
1基あたりの堤体幅	B_1, B_2 (cm)	150,200,250
堤体幅	B (cm)	300,400,500
見かけの堤体幅	B' (cm)	400,500,600,700,800
遊水部幅	l (cm)	100,200,300
天端水深	R (cm)	16, 20
堤高	D (cm)	30
波高・空隙代表径比	H_1/d'	0.26~2.16
1基あたりの相対堤体幅	$B_1/L, B_2/L$	0.35~1.08
相対堤体幅	B/L	0.70~2.16
見かけの相対堤体幅	B'/L	1.17~3.46
粒径レイノルズ数	Re	6239~57140
相対遊水部幅	l/L	0.23~1.30
相対天端水深	R/H_1	1.10~4.98

3. 2 実験結果と考察

(1) 透過率におよぼす相対堤体幅及び相対天端水深の影響

複列配置の低天端型人工リーフの透過特性を図-6 および図-7 に示す。図-6 は透過率(K_T)と相対堤体幅(B/L)の関係を示したもので、 H_1/d' と Re を固定し、パラメータを R/H_1 にしたものである。

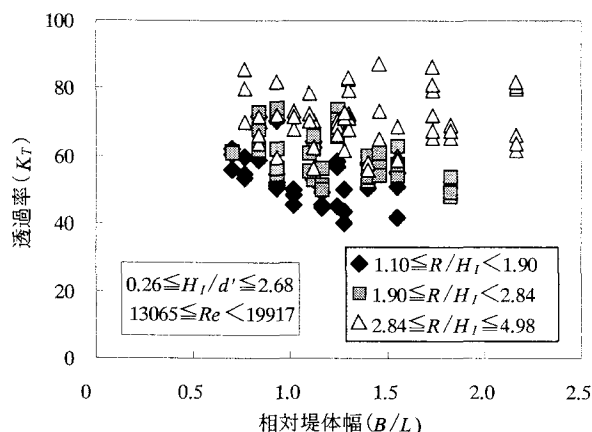


図-6 透過率と相対堤体幅

図より B/L の増加に伴って K_T が減少する傾向が認められる。また B/L が一定の場合は、 R/H_1 が大きくなると K_T も大きくなる。そして非碎波領域となる $2.84 \leq R/H_1 \leq 4.98$ では K_T はほとんど変化しない。このことから複列配置の低天端型人工リーフにおいても、堤体幅の増大にともなう透過抵抗の増加により、波高が減衰することが明らかとなった。

図-7 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、 H_1/d' と Re を固定し、パラメータを B/L にしたものである。

図より R/H_1 の増加に伴って K_T が増加する傾向が認められる。また R/H_1 が一定の場合では、 B/L が大きいほど K_T は小さくなる。

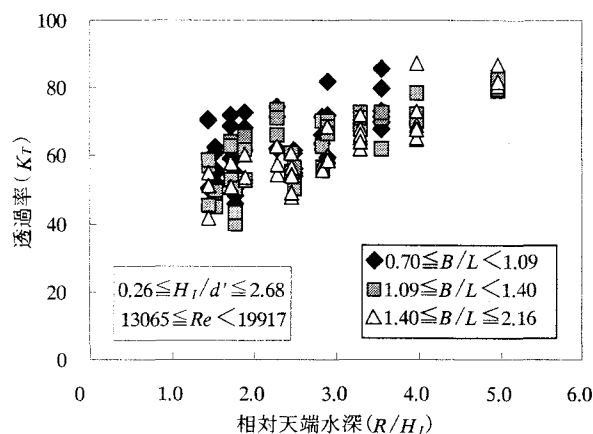


図-7 透過率と相対天端水深

以上、図-6 および図-7 より複列配置の低天端型人工リーフは、従来型的人工リーフの透過特性と同様の傾向を示す結果となった。これらの結果から明かなように B/L が小さく、そして R/H_1 が大きい領域では透過率は60~80%と大きく、人工リーフの断面決定に際し、目標透過率との関係を吟味することは当然必要となる。

(2) 透過率と相対遊水部幅の関係

図-8 は複列配置の低天端型人工リーフの透過率(K_T)と相対遊水部幅(l/L)の関係を示したもので、 R/H_1 と H_1/L を固定し、パラメータを B/L にしたものである。

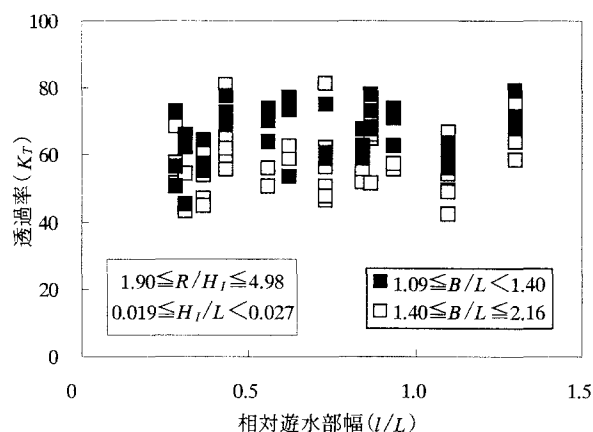


図-8 透過率と相対遊水部幅

図より l/L の増加に伴う K_T の変化は様でなく、 $l/L = 0.23, 1.10$ 付近で K_T は極小となり、特定の相対遊水部幅における波浪減衰効果は顕著である。これは1基目と2基目の間の遊水部で生じる反射波と入射波の、位相のずれによるものと考えられる。また l/L が一定の場合は、 B/L が大きいほど K_T は小さくなる。これは堤体の透過抵抗が増大することによるものである。

以上のことから人工リーフを複列に配置するに際し、

透過率の低減に関し最も有効な相対遊水部幅が存在することが明らかとなった。

(3) 透過率と相対堤体幅の関係

図-9 は複列配置の低天端型人工リーフの透過率 (K_T) と相対堤体幅 (B/L) の関係を示したもので、 R/H_I と H_I/L を固定し、パラメータを l/L にしたものである。

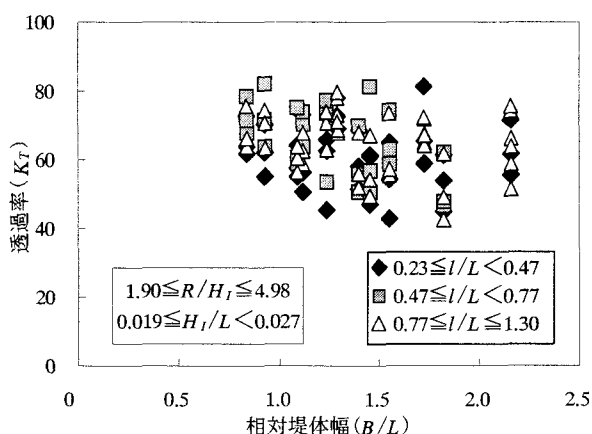


図-9 透過率と相対堤体幅

図より B/L の増加に伴って K_T が減少する傾向が認められる。また B/L が一定の場合は、 $0.23 \leq l/L < 0.47$, $0.77 \leq l/L \leq 1.30$, $0.47 \leq l/L < 0.77$ の順に K_T は小さくなる。

このことから実質堤体幅が同じ場合は、相対遊水部幅によって透過率の低減効果が異なることが明らかとなった。相対遊水部幅が波浪の減衰に寄与することは直立堤などでは検証されているが、人工リーフのような水面下に天端のある構造物においても同様の効果があることが確認された。

(4) 単堤と複堤の透過率の比較

図-10 および図-11 は単堤と複堤の透過率の比較を行うため、透過率 (K_T) と相対堤体幅 (B/L) の関係を示したものである。 H_I/d' , B/L , Re を固定し、パラメータを l/L とした。ただし、図中の $l/L=0$ は遊水部がない場合で、単堤の結果である。またそれぞれの図において R/H_I は $1.10 \leq R/H_I < 1.90$ および $2.84 \leq R/H_I \leq 4.98$ であり、固定している範囲が異なっている。

図-10 より B/L の増加に伴って K_T が減少する傾向が認められる。また B/L が一定の場合では、 l/L の違いによる K_T の変化は認められない。これは単堤の堤体幅 (B_0) と、複堤の実質堤体幅 ($B=B_1+B_2$) が同じ場合 ($B_0=B$)、遊水部の有無に関わらず単堤、複堤ともに同程度の K_T を得られることを示している。このことから R/H_I が小さい範囲では遊水部の影響よりも砕波による波浪減衰効果のほうが卓越する。したがって砕波領域において実質堤体幅が同じである場合には、遊水部のない単堤の人工

リーフと同程度の K_T を得ることができ、遊水部を設けることで海底に適度な地形変化をもたらすことから水産協調効果の促進につながると考えられる。

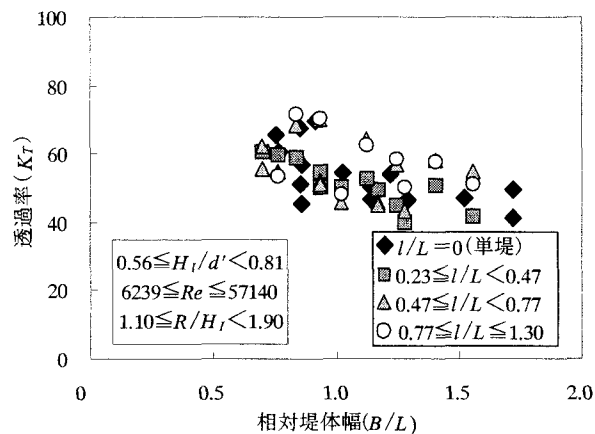


図-10 単堤と複堤の透過率の比較 ($1.10 \leq R/H_I < 1.90$)

図-11 より B/L の増加に伴う K_T の変化は単調でなく、 l/L によって複雑に変化している。また B/L が一定の場合、 l/L の違いによる K_T の変化は、 $l/L=0.23 \sim 0.47$ の K_T は、 $B/L \approx 1.8$ よりも小さい範囲で $l/L=0$ の K_T よりもかなり小さい。同様に $l/L=0.47 \sim 0.77$ の場合は $B/L \approx 1.3$, $l/L=0.77 \sim 1.30$ の場合は $B/L \approx 1.1$ よりも小さい範囲で $l/L=0$ の K_T よりも小さい。これは単堤の堤体幅 (B_0) と、複堤の実質堤体幅 ($B=B_1+B_2$) が同じ場合 ($B_0=B$)、遊水部を設置することで K_T が小さくなることを示している。このことから R/H_I が大きい範囲では、遊水部の影響は大きいことが分かる。したがって非砕波領域において実質堤体幅が同じである場合には、複堤の方が従来型の人工リーフよりも K_T が小さくなることから、小型船舶の吃水に配慮して天端水深を大きくする際には複列配置とする方が有利である。

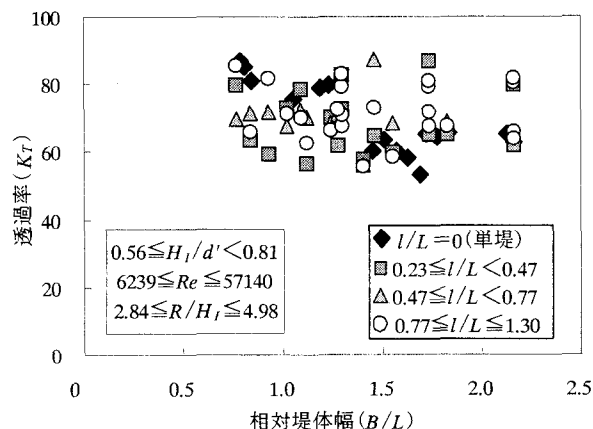


図-11 単堤と複堤の透過率の比較 ($2.84 \leq R/H_I \leq 4.98$)

また所定の目標透過率を達成する際に必要な B/L については、複堤とする方が B/L を小さくできることが分かった。これは単堤の堤体幅(B_0)と、複堤の見掛けの堤体幅($B'=B_1+l+B_2$)が同じ場合($B_0=B'$)、複列配置にすることで遊水部幅に相当する堤体幅の削減が可能となることを意味する。このことは海底の広い範囲を堤体で覆う部分が少なくて済み、漁場の減少・消失を危惧する漁業関係者に充分配慮することができる。そして堤体幅の削減は堤体材料の削減にもつながることからコストの縮減が可能となる。加えて本実験では堤体材料に全断面消波ブロックを使用していることから、離岸堤に用いられているコンクリートブロックを人工リーフに転用することのコスト比較も可能となるものである。

以上のことから航行船舶の座礁に配慮して天端水深を大きくするような場合、複列配置にすることは従来と同程度以上の波浪減衰効果が見込まれ、単堤と比較し実質の堤体幅を削減できることが明らかとなった。

4. 結言

従来の人工リーフは碎波と透過抵抗によって入射波の持つエネルギーを逸散させ、目標透過率を得ることを前提に設計・施工されている。これらの既存の人工リーフは、天端水深が浅く、広い堤体幅を必要とすることから海底の占有面積は大きい。このため小型船舶の航行や海洋性レクリエーションのための水域確保に関して、漁業関係者や海岸利用者から理解を得ることが困難であった。そこで天端水深が既存のものより大きく、全断面に消波ブロックを用いた複列配置の低天端型人工リーフを採りあげた。

これは天端水深を大きくとることで小型船舶の航行に配慮し、そして堤体の材料である割石、栗石などの確保が困難であることおよび既設離岸堤などに使用されていたブロックの転用を想定して全断面消波ブロックによる構造とした。また複列配置にすることで海底の占有面積の縮小ならびに周辺環境への負荷削減、断面縮小によるコストの削減、また遊水部により海底に適度な地形変化を与え、水産協調面の効果を期待するものである。

本論文はアンケート調査の結果より次のことを明らかにした。

- ①人工リーフの配置方法の決定は海浜安定、海面利用、自然環境保全などの要因に配慮して決められている。
- ②人工リーフの天端幅および堤体幅は、背後地の安全性、目標透過率の達成、小型船舶の吃水を考慮して決められている。
- ③人工リーフは波浪低減機能、堆砂機能、集魚機能が効果的に発揮されている。

④人工リーフの計画および建設において各事業担当者が最も苦慮する点は、漁業関係者・地元住民から了解を得る点である。

またアンケート調査の結果を基に、天端水深を大きく取り、複列配置の人工リーフ型構造物の透過特性に関する実験を行ない、以下のような結論を得た。

- ①複列配置の低天端型人工リーフは、これまでの人工リーフの透過特性と同様に相対天端水深の増大とともに透過率は増大し、相対堤体幅の増大とともに透過率は減少することが判明した。
- ②相対遊水部幅(l/L)の増加に伴う透過率(K_T)の変化は一律でなく、 $l/L=0.23, 1.10$ 付近で K_T は極小となり、遊水部による波浪減衰効果は顕著である。
- ③天端水深(R/H_f)の小さい範囲において単堤の堤体幅(B_0)と、複堤の実質堤体幅($B=B_1+B_2$)が同じ場合($B_0=B$)、遊水部の有無にかかわらず単堤、複堤ともに K_T は同程度となる。
- ④天端水深(R/H_f)の大きい範囲においては、単堤の堤体幅(B_0)と、複堤の実質堤体幅($B=B_1+B_2$)が同じ場合($B_0=B$)、遊水部を設けることで K_T は小さくなる。
- ⑤単堤の堤体幅(B_0)と、複堤の堤体幅($B'=B_1+l+B_2$)が同じ場合($B_0=B'$)、遊水部の効果で透過率はほぼ等しくなり、遊水部幅に相当する堤体幅の削減が可能となる。

参考文献

- 1) 井田康夫・矢野嘉章・檜本明子：低天端型人工リーフの透過特性，海洋開発論文集，土木学会，vol.19，pp225-230，2003。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 国土交通省河川局編：海岸統計（平成14年度版），279p，2002。
- 5) 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。
- 6) 笹島隆彦・山中広次・木村克俊・水野雄三・菊池聡一：2重堤の水理特性について，海岸工学論文集，第40巻，pp645-649，1993。
- 7) 佐藤正樹・川合邦広・北村泰介・宮部修一・佐伯浩：二重潜堤による波高減衰効果に関する実験的研究，海洋開発論文集，vol.12，pp273-278，1996。