

天端上水深の大きい 人工リーフ型構造物の透過特性

CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION AT ARTIFICIAL REEF WHERE SUBMERGED DEPTH OF CROWN IS LARGE

井田康夫¹・矢野嘉章²・樫本明子²
Yasuo IDA, Yoshiaki YANO and Akiko KASHIMOTO

¹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 大阪市旭区大宮五丁目 16-1)

²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 大阪市旭区大宮五丁目 16-1)

On the conditions of non wave-breaking on the artificial reef, wave energy is damped by surface friction and permeable resistance.

This paper deals with the experiment of transmission coefficient for the artificial reef which ratio of breakwaters width to wave length, B/L is changed in the range of ratio of submerged depth of crown to incident wave height, R/H_1 ; $1.61 \leq R/H_1 \leq 8.75$. Results are as follows.

Transmission coefficient, K_T decreases by the increase in ratio of breakwaters width to wave length, B/L and which becomes a small change at $B/L > 1.6$. And K_T increases by the increase in R/H_1 at a fixed rate at B/L .

About the relationship between K_T and ratio of incident wave height to block scale, H_1/d' , Reynolds number, Re , K_T decreases slightly by the increase in H_1/d' , moreover K_T increases slightly with the increase in Re . Then, K_T becomes a slight change at $Re > (2 \sim 3) \times 10^4$.

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

1. 緒言

我が国の海岸侵食は、年間160ヘクタールにも及ぶ広大な砂浜が消失しており、このままの状況で推移すると、10年後には世界最大級の人工島であるポートアイランド(神戸市)2個分に匹敵する1600haの貴重な砂浜が失われることになり、早急に海浜の安定化に資する対応が求められている。

2000年に施行された改正海岸法では環境に配慮した海岸構造物づくりが打ち出されており、その一環として多くの施工実績のある離岸堤などに代って人工リーフが施工されてきている。人工リーフは、強制砕波、表面摩擦および透過抵抗による波浪減衰効果および高い堆砂機能を利用した海岸侵食の防止といったハード面の機能に加え、水面下に透過性構造物があるため海浜景観の維持・向上、水質の維持、海洋性レクリエーション用の水域の創出および生態系の維持・確保といったソフト面の機能も有した工法である。しかしながら、本来の海岸

保全施設としての機能である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。人工リーフの計画・設計において天端上水深は多くの場合、設計波の砕波を意識して決定される。しかし、自然地形への影響を少なくし、小型船の航行安全性を確保した上、人工リーフの被覆材料を軽量化できる利点を考えれば、天端上水深を大きくすることは漁業補償水域の拡張などの問題点はあるが検討に値する。この場合当然ながら天端上水深を大きくすると砕波によるエネルギー逸散は期待できず、目標透過波高を達成するためには天端幅を大きくし、表面摩擦や透過抵抗を増大させる必要がある。そこで本論文では事例は少ないが建設済みの人工リーフにおける建設条件、特に天端上水深と天端幅の関係について検討を加えた後、従来あまり研究対象とされていなかった相対天端上水深(R/H_1)が1.6より大きい領域で、相対堤体幅(B/L)を最大2.5程度まで設定し、非砕波領域における人工リーフ型構造物の波浪減衰効果を実験的に明らかにする。そして、著者らが既に指摘している¹⁾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、波

の透過率が2つの無次元量、すなわち入射波高とブロックの空隙の代表長さの相対比（波高・空隙代表径比、 H_i/d' ）と粒径レイノルズ数（ Re ）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、かつ天端上水深が大きい場合においてこれらの無次元量と波の透過率がどのように関係するのかについても検討する。

2. 人工リーフの現状

昭和40年代より侵食対策施設として離岸堤が本格的に建設され、海岸保全に多大な効果をもたらしたが、海浜景観および海岸環境の維持・向上の観点から昭和60年代よりサンゴ礁の効用を人工的に創り出した人工リーフ（図-1）が施工され、高潮および侵食対策事業並びに海岸環境整備事業としての実を挙げている。

平成12年度版の「海岸統計」²⁾によれば人工リーフは岡山県、佐賀県を除く全国各地で建設され、その総数は644基にもおよんでいる。そして施工実績の増加とともに人工リーフに関する研究も各種の視点から数多く行なわれている。

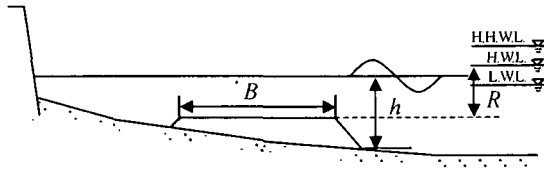


図-1 人工リーフの標準断面

一般に人工リーフは常時波浪時には表面摩擦および透過抵抗によって波のエネルギーを減衰させ、高波浪時には主として強制碎波により、さらに表面摩擦並びに透過抵抗が加わり目標透過波高を実現させるものである。このような人工リーフの波浪減衰効果は2つの無次元量、すなわち相対天端上水深（ R/H ）と相対堤体幅（ B/L ）によって支配されることは明らかである。[ここで、 R ：天端上水深、 B ：天端幅、 H 、 L ：沖波または堤体位置における波高、波長]

そこで海岸特性の異なる12ヶ所の代表的な人工リーフについて R/H と B/L の実態を把握することとした。検討対象とした海岸は北海道（函館）、新潟県（新潟、糸魚川）、茨城県（高戸）、千葉県（千倉）、三重県（波切、相差）、京都府（後ヶ浜）、兵庫県（慶野松原、津居山、香住）および福岡県（鐘崎）である。そして整理にあたり、波高および波長は沖波の値（ H_0 、 L_0 ）とし、天端上水深（ R ）は朔望平均満潮位（H.W.L.）と朔望平均干潮位（L.W.L.）を用い、 R/H_0 と B/L_0 を算出し、両者の関係を示したものが図-2である。図中、同じ記号の上位の値はH.W.L.時、下位の値はL.W.L.時を表わしている。

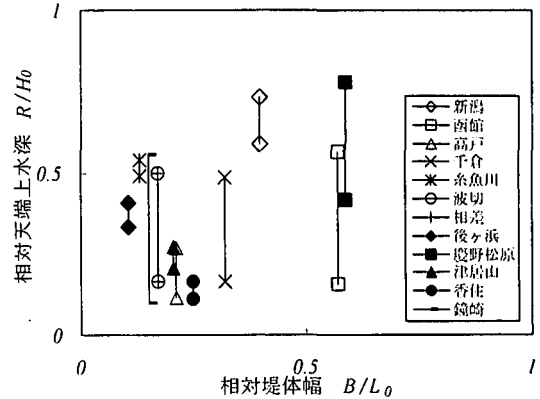


図-2 相対天端上水深と相対堤体幅

図より、 R/H_0 はH.W.L.時に最大値が慶野松原海岸の0.78、最小値は香住海岸の0.17の範囲にあり、 B/L_0 については慶野松原海岸で0.59で最大値を示し、後ヶ浜海岸の0.11が最小値となって分布している。この結果、(1)これらの事例はすべて強制碎波による波浪減衰効果を期待されていること。(2) R/H_0 と B/L_0 はほぼ線形関係にあり、 R/H_0 が大きくなるほど、 B/L_0 は大きくなっていることが判明した。

また堤前波の波長（ L ）を用いて、これらの事例の B/L を見ると $B/L=0.22\sim 1.01$ の範囲にあり、完成断面の堤体幅は最大1波長程度を目途としていることがうかがえる。

以上のように一部の建設事例によって、 R/H_0 と B/L_0 （ B/L ）の関係を検討したがこの両者を現状より大きくすることに関し、前述の1.のようなメリットもあり、以下のような実験を行ない、相対天端上水深および相対堤体幅が大きい領域の人工リーフ型構造物の透過特性を検討した。

3. 実験概要

(1) 実験装置と方法

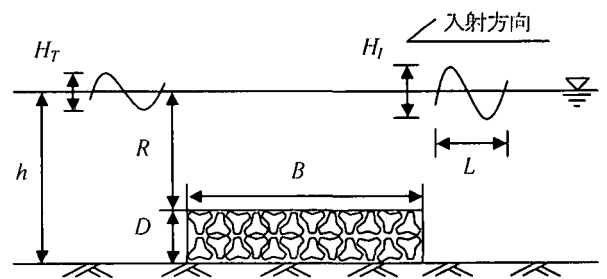


図-3 実験断面

実験は長さ50m、高さ1.2m、幅0.8mの2次元造波水槽で行ない、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、非碎波条件で所定

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 39 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図-4 に示すように 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 250, 500, 550, 600 および 750cm の 5 種類で、天端上水深 R は 25~35cm の範囲で変化させ、堤高 D はすべて 20cm と固定した。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 $B/L=0.53 \sim 2.53$ である。また、本実験では表面摩擦および透過抵抗による波浪減衰効果を明確に評価するため、非碎波領域で実験を行う必要がある。そこで文献⁵⁾の碎波限界 $R/H_I=1.6 \sim 1.8$ を参考にし、相対天端上水深 R/H_I は 1.61~8.75 の十分大きな領域に設定した。また、相対堤体幅 B/L については天端上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, ν : 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、表-2 に示す。

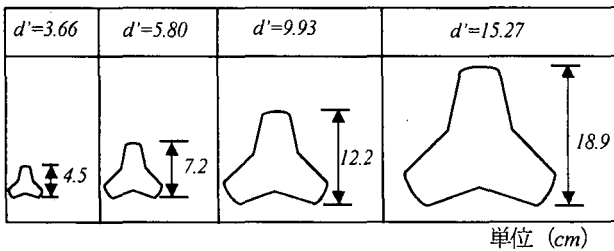


図-4 ブロック模型

表-1 入射波の諸元

水深 h (cm)	45, 50, 55
入射波高 H_I (cm)	4.00~15.52
周期 T (sec)	1.3~2.2
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
波の個数	39

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)	250, 500, 550, 600, 750			
天端上水深 R (cm)	25, 30, 35			
堤高 D (cm)	20			
波高・空隙代表径比 H_I/d'	0.26~4.24			
相対堤体幅 B/L	0.53~2.53			
粒径レイノルズ数 Re	3700~63200			
相対天端上水深 R/H_I	1.61~8.75			

4. 実験結果と考察

(1) 透過率と相対天端上水深の関係

図-5 は透過率 (K_T) と相対天端上水深 (R/H_I) の関係を示したものの一例で、 Re と H_I/d' を固定し、パラメーターを B/L にしたものである。図より、 R/H_I 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_I の重要性を示している。また、 R/H_I が一定の場合では B/L が大きいほど K_T は小さくなることが認められる。

(2) 透過率と相対堤体幅の関係

堤体幅の影響を明らかにするために、透過率と相対堤体幅 (B/L) の関係を示したものが図-6 で、 Re と H_I/d' を固定し、パラメーターは R/H_I である。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 の減少傾向は著しい。そして $B/L \approx 1.6$ より大きくなると K_T はあまり変化しないことがわかる。また B/L が一定の場合では R/H_I が小さいほど K_T は小さくなる傾向がある。詳細に見ると透過率は $B/L=1.5 \sim 1.6$ において $6.10 \leq R/H_I \leq 8.75$ の場合 75%、同様に $4.00 \leq R/H_I < 6.10$ の場合で 65%、 $2.51 \leq R/H_I < 4.00$ の場合で 60%、 $1.60 \leq R/H_I < 2.51$ の場合で 50% 程度の透過率が見られる。

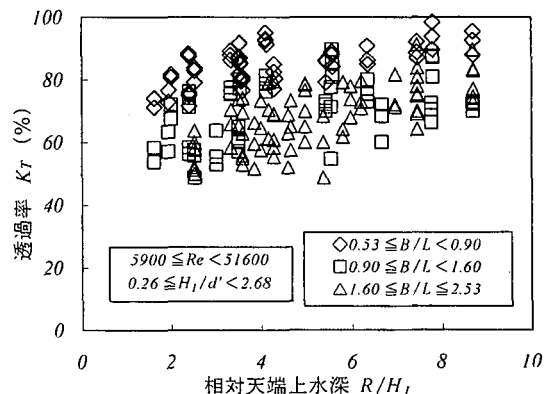


図-5 透過率と相対天端上水深

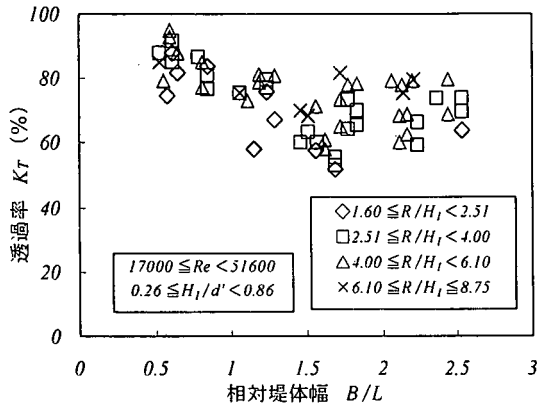


図-6 透過率と相対堤体幅

このように碎波が生じない $R/H_1=1.61\sim 8.75$ 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。

(3) 透過率と波高・空隙代表径比の関係

図-7～図-9は透過率と波高・空隙代表径比 (H_1/d') の関係を示したもので、 R/H_1 と B/L を固定し、パラメーターを Re にしたものである。ただし、それぞれの図において B/L は $0.53 \leq B/L < 0.80$ 、 $0.80 \leq B/L < 1.45$ および $1.45 \leq B/L \leq 2.53$ 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、 H_1/d' の増加に伴って K_T はわずかに減少傾向が見られる。また、相対堤体幅の増加に対しても図-7～図-9の透過率の分布範囲がそれぞれ $80\sim 95\%$ 、 $70\sim 90\%$ 、 $50\sim 80\%$ となり、波高減衰におよぼす B/L の影響が大きいことを示している。 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' の増加に伴う 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るため、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。

4) 透過率と粒径レイノルズ数の関係

図-10～図-12は透過率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、パラメーターを 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 $0.53 \leq B/L < 0.80$ 、 $0.80 \leq B/L < 1.45$ および $1.45 \leq B/L \leq 2.53$ であり、固定している範囲が異なっている。図-10～図-12において 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。また、相対堤体幅の増加に伴って図-10～図-12の透過率の分布範囲がそれぞれ $80\sim 95\%$ 、 $70\sim 90\%$ 、 $50\sim 80\%$ となり、 B/L が波高減衰効果に大きく影響を与えていることを示している。 Re と K_T の関係は、天端上水深が小さくなり、離岸堤のような直立型の透過性構造物に近づくほど密接となり、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上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。

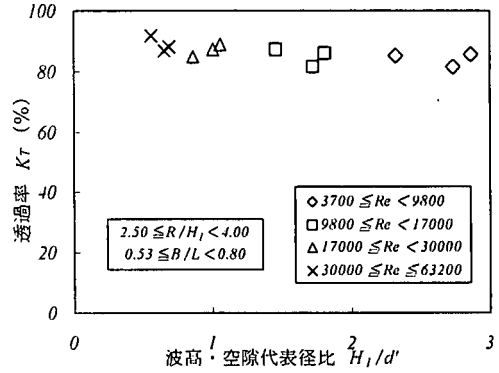


図-7 透過率と波高・空隙代表径比 ($0.53 \leq B/L < 0.80$)

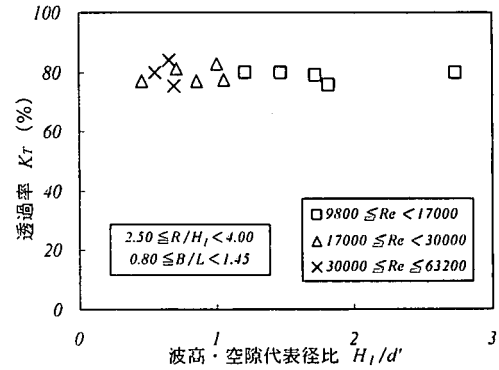


図-8 透過率と波高・空隙代表径比 ($0.80 \leq B/L < 1.45$)

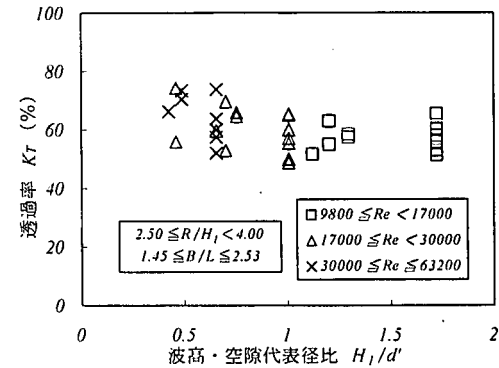


図-9 透過率と波高・空隙代表径比 ($1.45 \leq B/L \leq 2.53$)

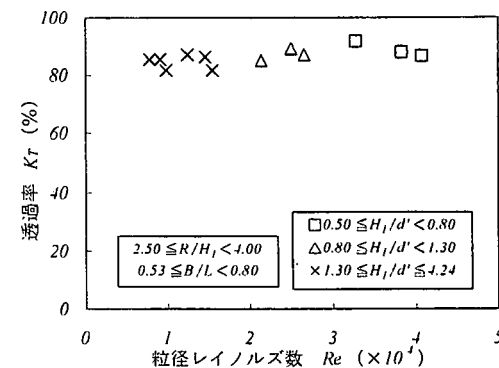


図-10 透過率と粒径レイノルズ数 ($0.53 \leq B/L < 0.80$)

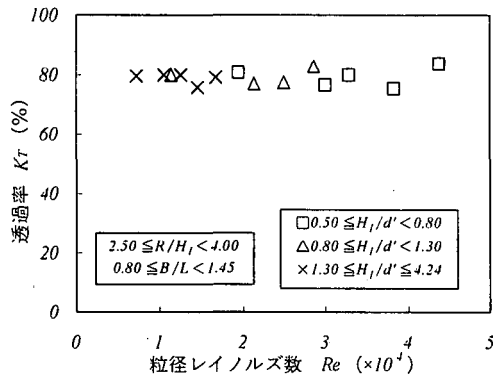


図-11 透過率と粒径レイノルズ数 ($0.80 \leq B/L < 1.45$)

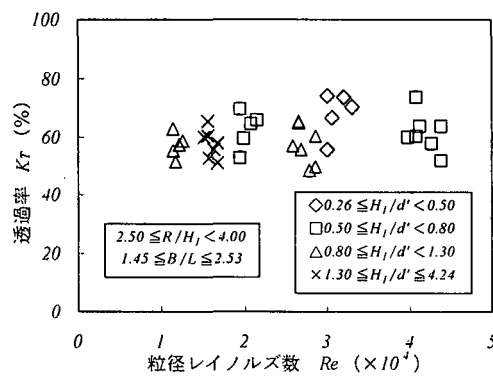


図-12 透過率と粒径レイノルズ数 ($1.45 \leq B/L \leq 2.53$)

(5) 直立型と人工リーフ型構造物の透過率の比較

図-13および図-14は、水面下にある人工リーフ型構造物の堤高 D とほぼ同じぐらい小さな堤体幅 B' をもつ平均海面上に構造物天端がある直立型（非越波）の構造物を対象とし、水中部の堤体容積がほぼ同じ場合の透過率の分布範囲の違いを示したものである。これらの図は粒径レイノルズ数 (Re)、相対水深 (h/L) および波形勾配 (H_1/L) を固定し、パラメーターを直立堤の堤体幅を B' とした B'/L 、そして人工リーフでは D/L を用いて、 K_T と H_1/d' の関係を示している。ただし、それぞれの図において人工リーフの B/L が $0.53 \leq B/L < 0.80$ および $1.60 \leq B/L \leq 2.53$ であり固定している範囲が異なっている。2つの図における人工リーフの H_1/d' と K_T の関係を見ると H_1/d' の増加に伴って K_T は減少し、直立堤の H_1/d' と K_T の関係と類似している。なお、直立堤の B'/L 、人工リーフの D/L による K_T の差は明確には認められない。また、図-13より人工リーフ ($0.53 \leq B/L < 0.80$) と直立堤の K_T の分布範囲は大きく異なり、人工リーフの K_T の方が明らかに $40 \sim 45\%$ 程度大きい。しかし図-14において ($1.60 \leq B/L \leq 2.53$) は、人工リーフと直立堤における透過率の分布範囲の差が $5 \sim 20\%$ 程度になっており、図-13に比べ、その差は縮小している。これは堤体幅が大きくなれば両者の透過率の差が小さくなることを示している。

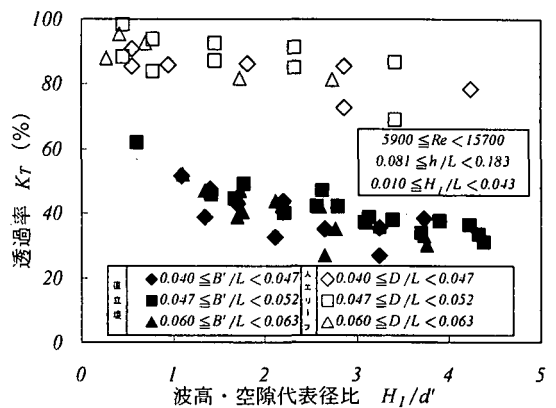


図-13 直立堤と人工リーフの透過特性の比較 ($0.53 \leq B/L < 0.80$)

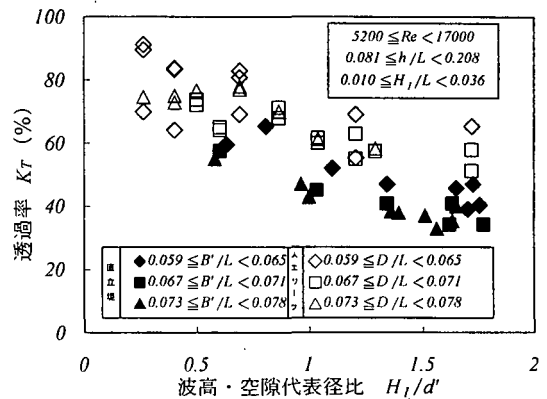


図-14 直立堤と人工リーフの透過特性の比較 ($1.60 \leq B/L \leq 2.53$)

5. 結言

海岸保全の考え方が線的防護方式から面的防護方式へと移行し、その一環として人工リーフが多数建設されている。それらの人工リーフの計画・設計に際し重要な相対天端上水深 (R/H_1) および相対堤体幅 (B/L) の関係を代表的な海岸における人工リーフを対象に検討した結果、この検討範囲において人工リーフは、おおむね $R/H_1 < 1.0$, $B/L < 1.0$ であるのが現状である。今後、海岸域の有効利用を図っていく中で天端上水深の増深、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上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 $R/H_1 = 1.61 \sim 8.75$, $B/L = 0.53 \sim 2.53$ といった広範囲に行ない、以下の結果を得た。

- ①天端上水深が大きい場合における人工リーフの透過率 (K_T) は相対天端上水深 (R/H_1) と相対堤体幅 (B/L) に支配される。
- ② R/H_1 の増加に伴って K_T は明らかに増加する。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、 $B/L=1.6$ より大きくなると K_T はあまり変化しない。また B/L が一定の場合では R/H_1 が小さいほど K_T は小さくなる傾向がある。詳細に見ると透過率は $B/L=1.5\sim 1.6$ において $6.10\leq R/H_1\leq 8.75$ の場合 75%、同様に $4.00\leq R/H_1<6.10$ の場合で 65%、 $2.51\leq R/H_1<4.00$ の場合で 60%、 $1.60\leq R/H_1<2.51$ の場合で 50%程度の透過率が見られる。透過率の減少傾向は $1.60\leq R/H_1<2.51$ の場合、 B/L の増加に伴い K_T は 80%程度から 50%程度まで減少し、 $B/L=1.6$ より大きくなると K_T はあまり変化しない。このような透過率の減少傾向は R/H_1 の値が大きくなるほど緩やかとなる。

このように砕波が生じない $R/H_1=1.61\sim 8.75$ 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 の値が存在することが明らかになった。

④ R/H_1 と B/L を固定し、波高・空隙代表径比 (H_1/d')と透過率 (K_T) の関係を見ると、 H_1/d' の増加に伴って K_T はわずかに減少する。

⑤ R/H_1 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天端上水深の大きい人工リーフの場合は直立堤と比べ、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_1/d' および Re が K_T におよぼす影響は小さい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 国土交通省河川局編：海岸統計（平成12年度版），261p，2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 矢野嘉章・井田康夫・篠原宏孝：人工リーフ型構造物の透過特性，第56回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.80-81，2001.