

トラップ式ダブルリーフと 従来型人工リーフとの比較実験

COMPARISON OF WAVE TRAPPING ARTIFICIAL REEF AND TWO-TYPE SUBMERGED BREAKWATER

福本 正¹・高村浩彰²・土橋吉輝³

Tadashi FUKUMOTO, Hiroaki TAKAMURA and Yoshiteru DOBASHI

¹工博 西松建設(株)技術研究所(〒242-8520 大和市下鶴間2570-4)

²正会員 工博 西松建設(株)技術研究所(〒242-8520 大和市下鶴間2570-4)

³正会員 西松建設(株)技術研究所(〒242-8520 大和市下鶴間2570-4)

A wave trapping artificial reef (WATAR) has been developed as an efficient wave barrier for a shore protection system. WATAR is a submerged concrete structure placed on a rubble mound. The concrete structure is perforated in such a way as to trap and break incident waves on the structure and cause effective wave energy dissipation and return flow in the structure. Irregular wave experiments were conducted in a wave flume to evaluate the effectiveness of WATAR, typical submerged breakwater and multi-row submerged breakwater in reducing wave transmission, wave set-up and reflection. The cross-shore variations of the measured wave heights are indeed encouraging.

Key Words : wave transmission, wave set-up, reflection, wave trapping artificial Reef,
typical Submerged breakwater, multi-row submerged breakwater, Experiment

1. はじめに

トラップ式ダブルリーフ(図-1参照)は、海岸空間の総合的管理・保全という社会的ニーズに対応すべく開発された新型人工リーフである。

この人工リーフの特徴¹⁾は、2段のステップを持つ複断面構造によって反射率を抑えながら碎波の規模を増大させると同時に、スリット構造を有する2段目リーフで碎波による水塊を捕捉することで、相反する事象である高い消波効果と水位上昇抑制の両立が可能なことである。また、景観への配慮といった従来型人工リーフの利点を引継ぎ、海浜保全に不可欠な低反射かつ上記特長に加え、魚礁・魚巢機能を持つなど海浜環境の保全・回復に優れた機能を有している²⁾。

2002年度には直轄海岸である石川海岸美川2工区において施工され³⁾、2003年1月から2月に実施した現地観測結果からも、トラップ式ダブルリーフの水理特性が検証された^{4),5)}。

一方、新型人工リーフについては、その消波性能の向上や環境共生を目的として、様々な構造形式が提案され

ている⁶⁾。中でも、消波ブロックを用いた透過型的人工リーフが注目されている。本論文では、この消波ブロックで形成された透過型的人工リーフおよび捨石等を基礎とする施工実績の多い不透過型的人工リーフとを対象とし、トラップ式ダブルリーフと同一の条件下での水理模型実験を実施した。消波性能、水位上昇量および反射率に着目し、各人工リーフの特性を整理した。これによって、トラップ式ダブルリーフの水理特性をより明確にした。

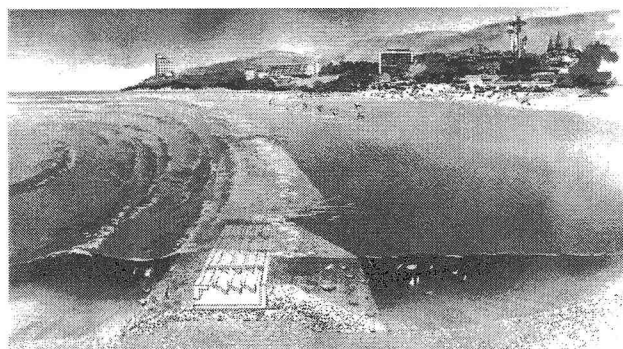


図-1 トラップ式ダブルリーフの設置イメージ

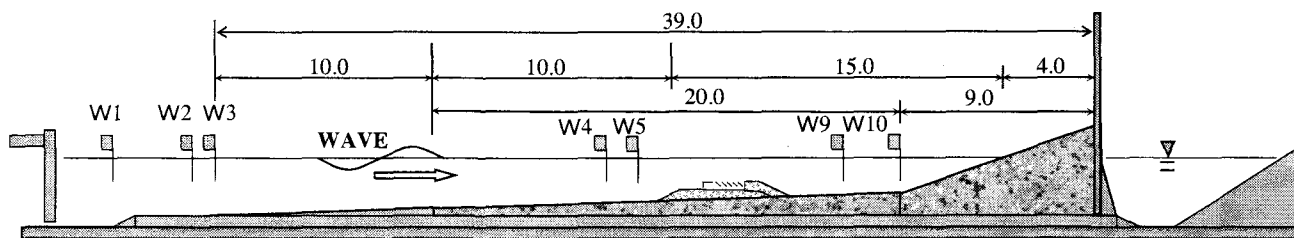


図-2 模型実験の概要

2. 水理模型実験の概要

(1) 地形および構造物の設定と共通条件

水理模型実験は西松建設(株)所有の長さ65.0m×高さ1.6m×幅1.0mの2次元造波水路を用いて行われた(図-2参照)。水路床には、1/100勾配のスロープを設け、水路のほぼ中央に構造物の模型を設置した。

図-3にトラップ式ダブルリーフの模型周りに配置した波高計(W)の位置を示す。W2およびW3を用いて入射波を求めた。W4およびW5を用いて構造物の反射率を求めた。また、透過波の波高および水位上昇量はW9で計測された値を用いた。透過型あるいは不透過型人工リーフの模型を設置した場合においても同一の位置(例えば、構造物のり先やのり肩など)で計測した。

造波波浪は全て不規則波であり、全ての波浪条件において200波以上が計測できるように作用させた。

トラップ式ダブルリーフ模型の主要部分はアクリル製であるが、重量調整のため格子状の底部は鋼製である。

(2) 実験条件

a) 不透過型人工リーフとの比較実験条件

捨石や被覆ブロック等で形成される不透過型人工リーフとの比較は模型スケールを1/20とし、固定床での実験とした。構造物の寸法および波浪条件は表-1に示すとおりである。不透過型人工リーフの概要を図-4に示す。設置水深は6.0mである。

中詰石は重量100~200kg/個の捨石を、天端被覆は重量8tの被覆ブロックを、前後のり面は重量1tの被覆石をそれぞれ用いた。

ここで、トラップ式ダブルリーフの天端幅とは図-3に示す2段目リーフの天端幅B2+B3であり、B3=5.0m(固定値)である。

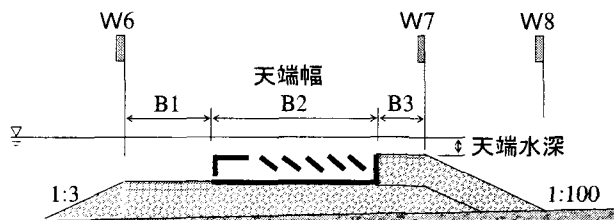


図-3 模型と波高計の配置状況

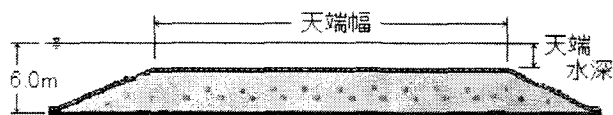


図-4 不透過型人工リーフ

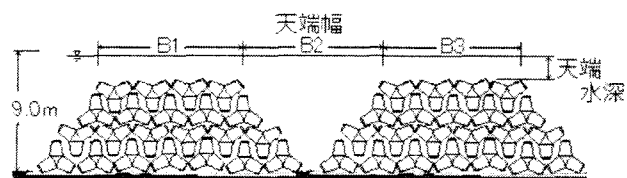


図-5 透過型人工リーフ

b) 透過型人工リーフとの比較実験条件

消波ブロック等で形成される透過型人工リーフとの比較は模型スケールを1/40とし、構造物前後の洗掘の状況を確認するため移動床で実施した。一般に消波ブロックを用いた透過型的人工リーフは、透過であるが故に背後の水位上昇量が小さいものの、消波性能が低いため⁶⁾、所定の消波性能を確保するためには不透過型人工リーフより大断面になることが多い。長所を生かした上でこの短所を補うため、複列配置形式が提案されている^{7,8)}。本実験でも図-5に示す新形式の透過型人工リーフを対象とした。

設置水深は9.0m(LWL時)である。実験条件等は表-2に示すように、トラップ式ダブルリーフは構造物の幅(B1, B2およびB3)を固定し天端水深Rを4種類設定した。透過型人工リーフは天端水深Rを固定し、形状寸法を3種類設定した。

波浪条件は、表-3に示すように2種類の波浪を対象とし、それぞれの波浪に応じて潮位を変化させた。

消波ブロックは、case2で安定検討を行い、重量40tのテトラポッドを用いた。移動床には八草珪砂を用い、現地粒径 $d_{50}=0.50\text{mm}$ 程度を模している。

表-1 不透過型人工リーフとの比較実験条件

	天端幅 (m)	設置水深 (m)	天端水深 (m)	波浪条件	
				有義波高 (m)	有義周期 (s)
トラップ式 ダブルリーフ	20.0	6.0	1.0	1.0	7.0
	25.0		2.0	2.0	10.0
不透過型 人工リーフ	25.0	7.0	2.0	3.0	12.0
	35.0	8.0	3.0	4.0	
	50.0				

3. 水理模型実験の結果

(1) 解析方法

消波性能の評価としては、伝達率 K_t （＝透過波高 H_t ／入射波高 H_0 ）を用いた。ここで、透過波高はW9の記録を統計解析しその有義値を用いた。入射波高は、W2およびW3の記録を入反射波分離解析し、その有義値を用いた。

一方、水位上昇量 η の評価としては、水位上昇量波高比 η/H_0 （＝水位上昇量／入射波高）を用いた。ここで、 η はW9の全記録の平均値を用いた。

(2) 不透過型人工リーフとの比較実験結果

不透過型人工リーフおよびトラップ式ダブルリーフの実験状況を写真-1（ $B=50.0\text{m}$, $R=1.0\text{m}$ ）および写真-2（ $B_1=10.0\text{m}$, $B_2=20.0\text{m}$, $B_3=5.0\text{m}$, $R=3.0\text{m}$ ）にそれぞれ示す。作用波浪はともに $H_0=2.0\text{m}$, $T_0=10.0\text{s}$ である。

a) 伝達率

天端幅波長比 B/L_0 を変数とし、天端水深波高比 R/H_0 ごとに伝達率 K_t を整理したものが図-6である。 $R/H_0=0.3$ とは $0.2 < R/H_0 \leq 0.4$ の値である。図中の実線はトラップ式ダブルリーフの結果、破線は不透過型人工リーフの実験結果であり、それぞれは対数近似曲線である。ここで、トラップ式ダブルリーフの結果には、2003年に実施した現地観測結果⁷⁾も含んでいる。また、トラップ式ダブルリーフ天端幅 B はトラップ式ダブルリーフの函体幅 B_2 +背面マウンド幅 B_3 である（図-3参照）。

$R/H_0 \leq 0.5$ の場合、近似曲線の精度が $R/H_0 > 0.5$ に比べて良くない。全てのデータを整理すると、設置水深 h が深く天端水深 R も深い場合（例えば、 $h=8.0\text{m}$, $R=3.0\text{m}$ の場合）は、 K_t が急に増加すること、設置水深に関らず天端水深が浅い場合（ $R=1.0\text{m}$ ）には K_t が低下することが確認された。 $R/H_0 > 0.5$ の場合も同様の傾向にあるものの、 K_t そのものの値が大きいいため明確な差とならない。 R/H_0 が増加するとともに、両者の K_t の差が小さくなる（各 R/H_0 における実線および破線を参照）。

一方、 B/L_0 の増加とともに K_t が減少する傾向は、両者とも同じであるが、トラップ式ダブルリーフの減少率は小さい。 $B/L_0=0.1$ に着目すると、トラップ式ダブルリーフの $R/H_0=0.5$ の値と不透過型人工リーフの $R/H_0=0.3$ の値がほとんど同じである。

以上のことから、トラップ式ダブルリーフは不透過型人工リーフに比べて、小断面で同等の消波性能を確保することができる。

b) 水位上昇量

同等の消波性能下における水位上昇量を比較するため、縦軸に水位上昇量波高比 η/H_0 を、横軸に K_t を取り、 B/L_0 ごとに整理したものが図-7である。 $B/L_0=0.1$ とは $0.05 < B/L_0 \leq 0.15$ の値である。図中の実線はトラップ式ダブルリーフの結果、破線は不透過型人工リーフの実験結

表-2 透過型人工リーフとの比較実験条件

実験ケース名		天端幅(m)			天端水深 (m)
		B1	B2	B3	
トラップ式 ダブルリーフ	T1	7.5	15.0	5.0	1.5
	T2				2.3
	T3				2.7
	T4				3.5
透過型 人工リーフ	M1	20.0	20.0	20.0	1.5
	M2		30.0	10.0	
	M3	17.5	20.0		

表-3 波浪条件

	有義波高(m)	有義周期(s)	潮位(m)
case1	4.0	9.0	0.45
case2	9.0	13.0	0.88

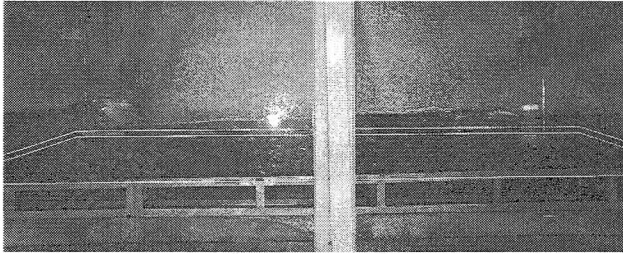


写真-1 不透過型人工リーフの実験状況

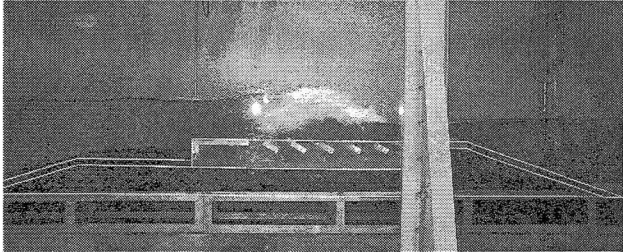


写真-2 トラップ式ダブルリーフの実験状況

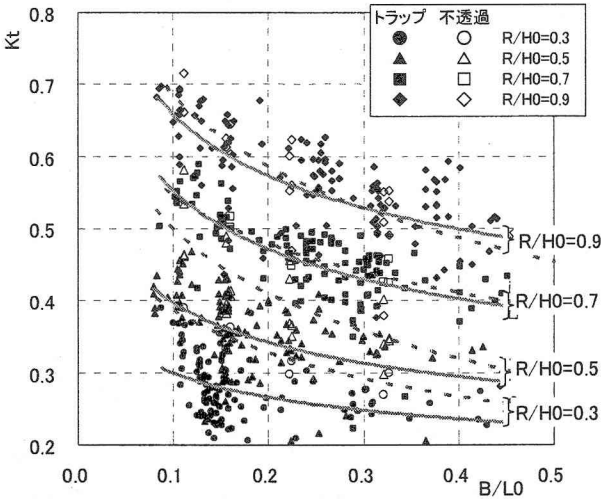


図-6 不透過型人工リーフとの伝達率の比較

果であり、それぞれは対数近似曲線である。伝達率と同様にトラップ式ダブルリーフの結果には、2003年に実施した現地観測結果も含む。両者の実験結果を $B/L0$ ごとに区分しているものの、明確な特性は見られない。

両者とも、 K_t の増加とともに $\eta/H0$ は減少するものの、トラップ式ダブルリーフの減少率は小さい。また、図よりトラップ式ダブルリーフの $\eta/H0$ は不透過型人工リーフの値よりも小さいことが分かる。現地海岸での水位上昇量が断面実験結果の1/2以下⁶⁾となることを考慮しても、トラップ式ダブルリーフの水位上昇量の抑制効果が高いことが確認される。

c) 反射率

同等の消波性能下における反射率を比較するため、縦軸に反射率 K_r を、横軸に K_t を取り、 $B/L0$ ごとに整理したものが図-8である。 $B/L0=0.1$ とは $0.05 < B/L0 \leq 0.15$ の値である。図中の実線はトラップ式ダブルリーフの結果、破線は不透過型人工リーフの実験結果であり、それぞれは対数近似曲線である。なお、伝達率および水位上昇量とは異なり、現地観測結果の反射率は含んでいない。

両者の実験結果を、 $B/L0$ ごとの区分したところ、 K_t の増加とともに K_r は減少するものの、明確な特性が見られず、両者の対数近似の精度は良くない。しかしながら、トラップ式ダブルリーフの反射率は不透過型人工リーフの値に比べて小さく、不透過型人工リーフの78%程度に抑えられている。

これらのことから、トラップ式ダブルリーフは反射率が小さいため前面の洗掘が生じにくいものと推察する。

(3) 透過型人工リーフとの比較実験結果

伝達率が $K_t=0.4$ 以下となる断面において実験を開始した。この時、天端水深 R は小型船舶の航行を可能とするため、1.5m (LWL時)とした。前出の図-5に示すように透過型人工リーフは、断面を決定するためのパラメータが多いため、算定式¹¹⁾を用いて $B1=17.5m$ 、 $B2=20.0m$ 、 $B3=10.0m$ ($B1$ と $B3$ の合計27.5mはトラップ式ダブルリーフの1段目および2段目の幅の合計と同じ)を最小断面として設定し、断面寸法を大きくすることで伝達率を変化させた。トラップ式ダブルリーフは、 $B1=7.5m$ 、 $B2=15.0m$ 、 $B3=5.0m$ を基準とし、天端水深を深くすることで、透過型人工リーフとの伝達率および水位上昇量の比較を行うこととした。

このように、両者はパラメータが一様に変化していないため、天端水深天端幅比 (R/B) なる無次元パラメータを設定し、以降、 R/B を用いてデータ整理を行った。ここで、トラップ式ダブルリーフの天端幅 B は2段目リーフの幅 $B2+B3$ であり、透過型人工リーフの天端幅 B は $B1+B3$ としている。

透過型人工リーフおよびトラップ式ダブルリーフの実験状況を写真-1 ($B1=B2=B3=20.0m$ 、 $R=1.5m$) および写真-2 ($B1=10.0m$ 、 $B2=20.0m$ 、 $B3=5.0m$ 、 $R=3.0m$) にそれぞれ示す。

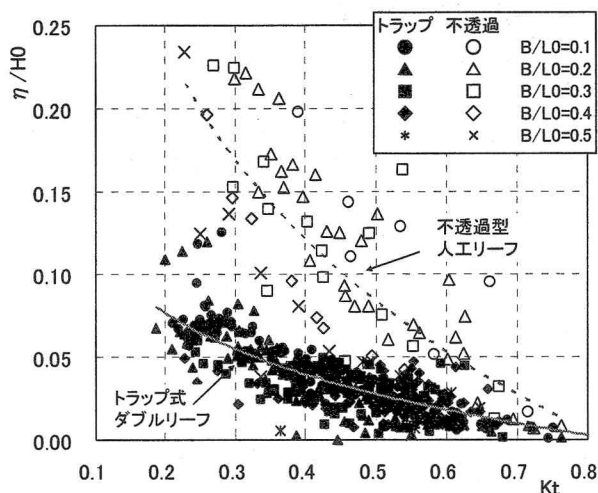


図-7 不透過型人工リーフとの水位上昇量の比較

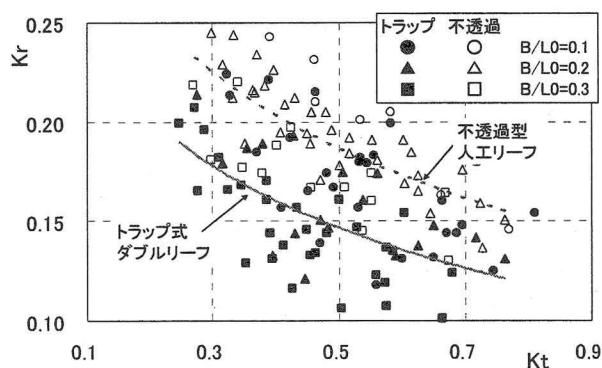


図-8 不透過型人工リーフとの反射率の比較

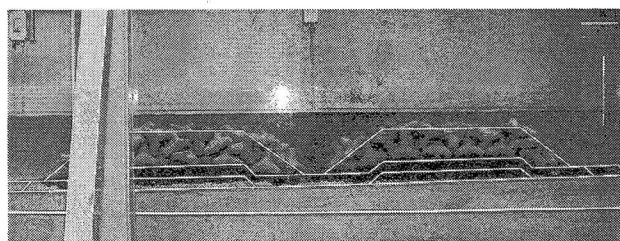


写真-3 透過型人工リーフの実験状況

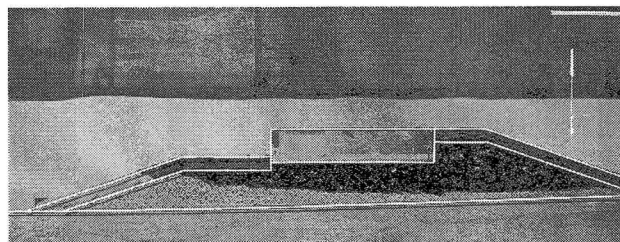


写真-4 トラップ式ダブルリーフの実験状況

a) 伝達率

図-9は縦軸に伝達率 K_t を、横軸に R/B を取り整理したものである。図中には両者の実験ケース番号も併記している。トラップ式ダブルリーフは R が深くなるとともに($T1 \rightarrow T4$)、透過型人工リーフは断面が小さくなると

ともに (M1→M3), それぞれの K_t が大きくなる。また、両者の K_t に大きな差はなく、波浪条件の違いによる K_t の差もほとんどない。

一方、図から K_t と R/B を読取ると表-4となる。 K_t と $(R/B)_T / (R/B)_M$ の関係は(1)式のようになり、トラップ式ダブルリーフの R/B は透過型人工リーフの2倍以上であることが分かる。すなわち、天端水深 R が2倍以上深くても、あるいは天端幅 B が2倍以上小さくても同等の性能が確保できることを示唆する。

$$K_t = 0.065 \left[\frac{(R/B)_T}{(R/B)_M} \right] + 2.033 \quad <R^2=0.953> \tag{1}$$

b) 水位上昇量

図-10は縦軸に波高水位上昇量比 η/H_0 を、横軸に R/B を取り整理したものである。両者の η/H_0 に大きな差はないことが確認できる。

K_t とは逆に、トラップ式ダブルリーフは R が深くなるとともに (T1→T4), 透過型人工リーフは断面が小さくなるとともに (M1→M3), それぞれの η/H_0 が小さくなる。また、両者とも、case2のように波高が大きい場合は η/H_0 が大きくなる。

トラップ式ダブルリーフの η/H_0 が透過型人工リーフより若干小さく、特に、case2の場合には透過型人工リーフの η/H_0 は0.1前後に集中しており、両者の差が顕著となる。

一方、図中のcase1を対象として、 η/H_0 と R/B を読取ると表-5となる。 η/H_0 と $(R/B)_T / (R/B)_M$ の関係は(2)式のようになり、トラップ式ダブルリーフの η/H_0 は透過型人工リーフの2倍以上となり、 K_t と同様に天端水深 R が2倍以上深くても、あるいは天端幅 B が2倍以上小さくても同等の性能が確保できることを示唆する。

$$\eta/H_0 = -0.194 \left[\frac{(R/B)_T}{(R/B)_M} \right] + 2.690 \quad <R^2=0.998> \tag{2}$$

ここで、両者の η/H_0 と K_t の関係を示したものが図-11である。 η/H_0 と K_t は反比例の関係にある。すなわち、消波性能が高い場合には水位上昇量が大きくなる。case1のような波高が比較的小さい条件下の $K_t > 0.47$ では、透過型人工リーフの水位上昇量は、トラップ式ダブルリーフのそれを下回る結果となっている。

c) 反射率

図-12は縦軸に反射率 K_r を、横軸に R/B を取り整理したものである。

トラップ式ダブルリーフは R/B が大きくなるとともに、すなわち、 R が深くなるとともに、 K_r が小さくなる傾向にあるが、図-8のような明確な変化は少なく、ほぼ一定であると言える。透過型人工リーフの K_r は R が一定であるため、 K_r もほぼ一定であり、透過型人工リーフは $0.25 \leq K_r < 0.34$ に集中している。透過構造物であるため、

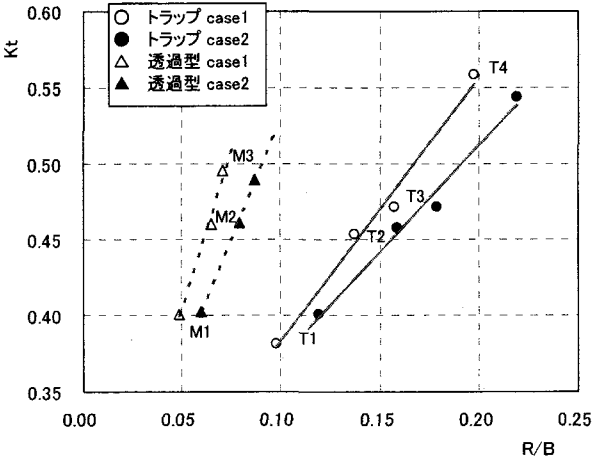


図-9 透過型人工リーフとの伝達率の比較

表-4 K_t と R/B の読取り値

K_t	トラップ $(R/B)_T$	透過型 $(R/B)_M$	$\frac{(R/B)_T}{(R/B)_M}$
0.40	0.115	0.055	2.09
0.45	0.148	0.068	2.18
0.50	0.180	0.081	2.22

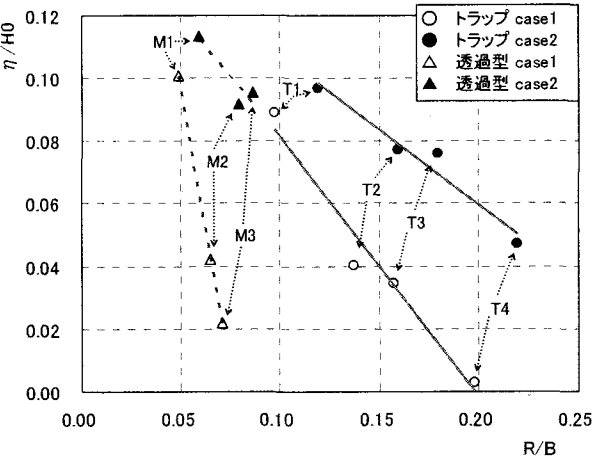


図-10 透過型人工リーフとの水位上昇量の比較

表-5 η/H_0 と R/B の読取り値

η/H_0	トラップ $(R/B)_T$	透過型 $(R/B)_M$	$\frac{(R/B)_T}{(R/B)_M}$
0.02	0.175	0.070	2.50
0.04	0.149	0.065	2.29
0.06	0.125	0.059	2.12
0.08	0.103	0.054	1.91

波浪条件による K_r の差が小さいと推察する。Case2のように波高が大きい場合は、両者とも K_r が大きくなり、トラップ式ダブルリーフはその傾向が強い。

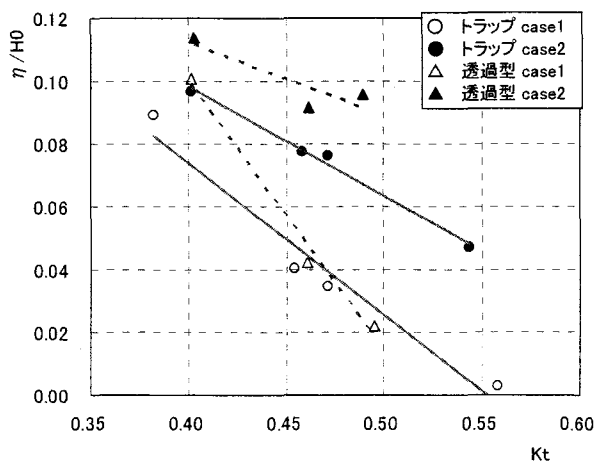


図-11 η/H_0 と Kt との関係

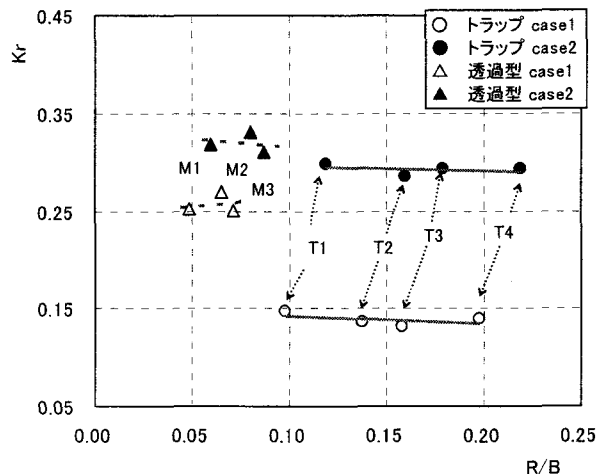


図-12 透過型人工リーフとの反射率の比較

4. おわりに

トラップ式ダブルリーフの水理特性を明確にするために、水理模型実験を行い不透過型および透過型人工リーフの結果と比較した。

まず、トラップ式ダブルリーフは不透過型人工リーフに比べて小断面で同等の消波性能が確保できることが確認された。また、同一の消波性能下において、低反射かつ水位上昇量の抑制効果が高い構造物であることが検証された。

一方、トラップ式ダブルリーフと透過型人工リーフの特性において、消波性能および水位上昇量はそれらの値にほとんど差がない。しかしながら、ここでもトラップ式ダブルリーフは小断面で同等の性能が確保できることが確認された。

不透過型および透過型人工リーフに比べて、トラップ式ダブルリーフ構造物前面の反射率は小さい。このことは、構造物前面の洗掘が生じにくいことを示唆するものである。

参考文献

- 1) 安田孝志：トラップ式ダブルリーフによる自然の営力を生かした海浜環境保全に関する研究，（財）河川環境管理財団，第7回河川整備基金助成事業成果発表会報告書，pp. 28-38，2000.
- 2) 東川 敏，安田孝志：新型人工リーフ工法の開発と施工，土木学会誌，Vol. 88，No. 2，pp. 37-40，2003.
- 3) 東川 敏：新型人工リーフの施工，海岸，Vol. 42，No. 2，pp. 70-72，2002.
- 4) 福本 正，土橋吉輝，高村浩彰，二木 渉，安田孝志：実海域における新型人工リーフの水理特性，海工論文集，第51巻，pp. 766-770，2004.
- 5) 土山明雄：新型人工リーフの現地における機能と特性-トラップ式ダブルリーフ-，土木技術，Vol. 60，No. 2，pp. 43-48，2005.
- 6) 社団法人全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き（改訂版），95p.，2004.
- 7) 白石哲也，土市 進，近川喜代志，千葉明裕，小森俊英：新潟西海岸潜堤形状検討実験について，海洋開発論文集，第18巻，pp. 671-676，2002.
- 8) 佐藤正勝，齊藤好生，吉澤 裕：ダンデム型人工リーフにおける海岸保全効果，海工論文集，第51巻，pp. 776-780，2004.