

透過性消波構造物の消波効果から見た分類

宇多高明*・村井禎美**・松尾和男***・藤原隆****

1. まえがき

近年、海洋開発に関する議論が再び盛んになった。中でも海洋空間利用については種々の検討が行われており、従来利用があまり図られなかった外洋に面した沿岸域を有効利用することを目的とした計画が提案されている。その場合、外洋に面した海岸は一般に波浪条件が厳しいので、波浪・流れ・漂砂を制御する消波構造物の建設が必要である。このような目的に合致した消波構造物の研究は1950年頃から始まり、これまでに多くの構造物が提案されてきた。土研においても、すでに5種類の消波構造物の消波効果について個々の特性を調べたり¹⁾。しかし、構造物を選定する際には個々の構造物の消波効果について調べるだけでは不十分であり、各種の消波構造物の特性をできる限り普遍的に調べておくことが重要である。こうした研究は、これまでも消波構造物の分類をすることによって行われてきている²⁾。しかし、従来の研究では機能別の分類に関しては幅広く取り扱われているものの、実設計でどのようなパラメータに着目したら良いかという点については、やや説明不足であると思われる。

本研究では8種類の構造物について、消波効果に影響を及ぼすパラメータに着目して分類を行った。これにより、波浪条件および構造物形状寸法と消波効果の関係を明らかにする。

2. 実験方法

8種類の構造物形態を図-1に示す。詳細な説明は文献1)に述べられているので省略する。ただし、チューブ式は、固定式と可動式の2種類に分かれる。前者は潜堤

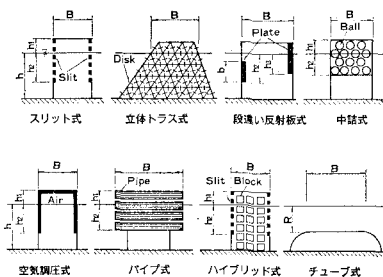


図-1 消波構造物の形態

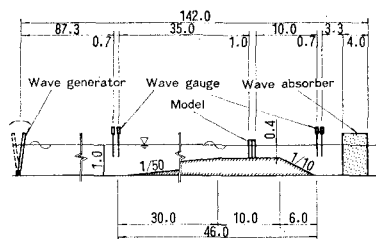


図-2 実験装置

タイプの消波構造物であり、碎波により透過波高の低減を図る。後者は、柔らかい膜を用いて前者と同一形状に造られた外殻の内部に水を満たした構造物である。前者の消波機能に加え、膜の動きにより透過波高の低減を図る。

測定項目は、入射・反射・透過波高である。各構造物について図-2に示す実験装置を用い、波浪条件を11～15種類変化させて測定を行った。

3. 実験結果

3.1 透過率

スリット式、立体トラス式、中詰式、ハイブリッド式、チューブ式の5種類の構造物の透過率 K_T と波形勾配 H/L の関係を図-3に示す。これより次のことがわかる。

- 1) 各構造物とも H/L の増加に伴い K_T は減少する。
- 2) チューブ式を除く透水性構造物では、平均的に見て K_T はスリット式、立体トラス式、中詰式、ハイブリッド式の順で低くなる。

立体トラス式のように構造物自体が小さな部材で構成されている場合、波の入射に伴い多くの渦が発生するためエネルギー逸散が起こる。この種の構造物では、後に説明するように K_T は主として H/L の関数として表わされる。また、チューブ式の場合には、天端上での碎波により透過率が低下する。碎波により運動が波の形態を保てなくなり乱れが生ずるが、この乱れは水平速度成分の2乗に比例すると考えられる。結局、チューブ式のエネルギー損失については、抗力仕事によってエネルギー逸散を生じる透水性構造物と同様に扱うことができる。

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員

*** 正会員 飛鳥建設(株)

**** 正会員 工修 前建設省土木研究所海岸研究室部外研究員

建設省土木研究所海岸研究室部外研究員
東洋建設(株)

2)の結果は、空隙率が小さくなるに従い K_T が低下したものと考えられるが、その理論的根拠については4.2で詳述する。

透水性を有する構造物では、波の入射方向に幅 B が大きくなると抗力によるエネルギー損失が増加するので、 K_T は減少する。この例として、スリット式、立体

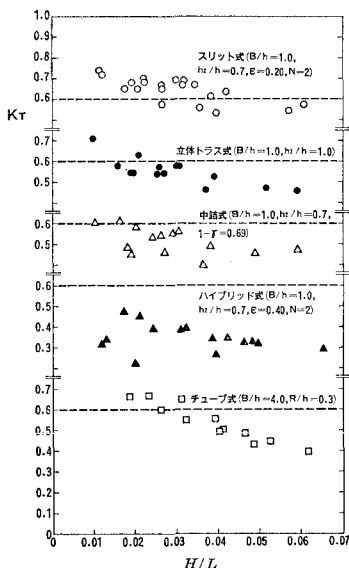


図-3 透水性構造物の K_T と H/L の関係

K_T と相対幅 B/L の関係を図-4に示す。すなわち、これらの構造物の K_T は B/L の増加に伴い減少する。間隔が B に等しいスリット式の場合、 B/L を十分大きくとれば各スリットの効果が独立に発揮される。実験の範囲では B/L が十分大きくないので、 K_T はまだ減少傾向を持つ。

チューブ式構造物に関しては、砕波させることが重要である。砕波には波高天端水深比 R/H_0 と相対幅 B/L_0 が、 K_T を低下させる主な要因となる。チューブ式の K_T と B/L_0 との関係について、 R/H_0 をパラメータとして図-5に示す。図中の曲線は人工リーフの透過率に関する実験曲線である⁸⁾。固定チューブの実験結果は、人工リーフの実験曲線とよく一致している。また、可動

チューブの K_T は、固定式よりも全体的に低くなっている。ここでは詳細な検討を避けるが、可動チューブ式を構成する膜の動き方が、波の進行に対して半波長ずれていることが目視で観察されたことより、両者の位相のずれが K_T の低下の原因と考

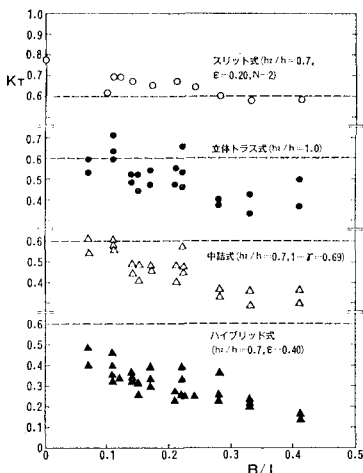


図-4 透水性構造物の K_T と B/L の関係

えられる。

これまでに述べた構造物は、水粒子の速度成分の2乗に比例したエネルギー損失により透過波高の低減を図るものである。

以下では、他の機構で消波する構造物を取りあげて透過率の面から考察する。

パイプ式、段違い反射板式、空気調圧式の K_T と水深波長比 h/L の関係より次のことがわかる(図-6)。

- 1) パイプ式の K_T は、 h/L が大きくなると減少する。
- 2) 段違い反射板式および空気調圧式では、 $h/L \geq 0.1$ で K_T は h/L の増加に伴い減少する。ただし、 $h/L < 0.1$ では K_T の増加傾向が見られる。
- 3) 2)に挙げた構造物の K_T は、パラメータ B/h が大きくなるとやや低下するが、実験の範囲では K_T と h/L の関係に比べて K_T の低下割合は小さい。

特徴1)については、その理論的根拠を4.3で述べるが、パイプ式における波浪エネルギーの損失の主要因が、波動を流れに変換したことによると考えられる。特徴2)の理由は次のようである。波のエネルギーの水深方向分布は、波長 L が短いとき静水面水付近に集中する構造物では反射率 K_R が高くなり、逆に K_T は低くなる。特徴3)の理由は次のようである。すなわち、段違い反射板式および空気調圧式は、構造物内部で乱れのエネルギー損失を生じないため、実験の範囲で構造物の幅 B は K_T に対してほぼ無関係となる。ただし、パイプ式では、 B が大きくなると波のエネルギーを流れに変換する効果が高まるので、 B/L の増加に伴い K_T は減少する。

以上、透過率に関する考察を次にまとめておく。

- 1) エネルギー損失が水粒子の水平速度成分の2乗に比例する透水性構造物の K_T は、 H/L の増加に伴い減少する。また、 B/L の増加に伴い

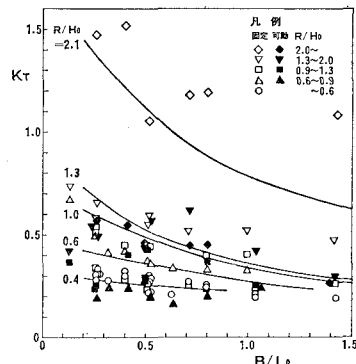


図-5 チューブ式構造物の K_T と B/L_0 の関係

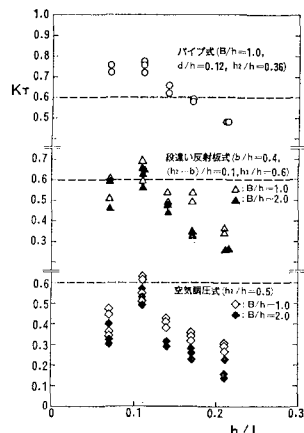


図-6 各種構造物の K_T と h/L の関係

K_T は減少する。

- エネルギー損失の小さい構造物の K_T は、波高 H の大小によってあまり変化せず、 h/L の関数で表わされる。つまり、 h/L の増加に伴い K_T は減少する。この種の構造物の K_T は、 B/L にはほぼ無関係である。
- パイプ式は、波動を流れに変換することにより波のエネルギーを損失させる機能を持つため、 K_T は H の値にはほぼ無関係であり、 h/L の関数として表わされる。また、 B を大きくすると波動を流れに変換する機能が高まるので、 K_T は B/L の増加に伴い減少する。

3.2 反射率

空気調圧式、中詰式、ハイブリッド式、パイプ式、立体トラス式およびチューブ式の反射率 K_R と水深波長比 h/L の関係を 図-7 に示す。有脚式構造物で静水面付近を遮断する場合、水面付近の波のエネルギーが全て反射すると考えれば、 L が短いほど、すなわち、 h/L が大きくなるに従い反射率は増加する。空気調圧式、パイプ式ではこの傾向が見られる。これに対し、構造物により水底が遮断され静水面付近には障害物がない場合、波のエネルギーは水底付近で全て反射されると考えられる。つまり、チューブ式では、有脚式の場合とは逆に、 h/L が大きくなると K_R は減少する。また、中詰式、ハイブリッド式、立体トラス式などの透水性構造物では、 h/L の増加とともに K_R が緩やかに減少する傾向があるが、これは理論的に説明される⁴⁾。

次に、波長の数分の1程度の大きさの遊水部を持つ構造物の反射率について検討する。この例として、段違い反射板式とスリット式の K_R と B/L の関係を 図-8 に示す。これらの構造物では、2つ以上の壁体で反射波が生ずる。同一方向に進む2つの反射波を考えると、その位相のずれが半波長 ($B/L = 1/4$) のとき K_R が最小となる。

以上、反射率に関する考察を次にまとめておく。

- 遊水部を持たない構造物の K_R は h/L の関数として表わされる。
- 遊水部を持つ構造物の K_R は、 B/L の関数として表わされ、 $B/L = 0.25$ のとき K_R が最小とな

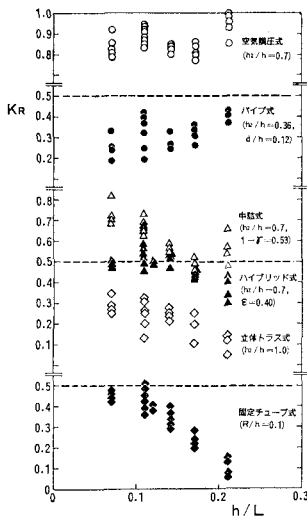


図-7 遊水部を持たない消波構造物の K_R と h/L の関係

る。

3.3 吃水比と消波効果

一般に構造物の吃水比 h_2/h と K_R との関係については、 h_2/h の値が大きくなると K_T は減少し、 K_R は増加する¹⁾。

パイプ式の場合

も同様であるが、変化の度合いが他の構造物に比べて緩やかなのが特徴である (図-9)。 $h_2/h = 0.3 \sim 0.7$ の間で消波効果には有意な変化は見られず、従って $h_2/h \approx 0.3$ としても他の構造物と同程度の消波効果が得られる。この理由として、パイプ式構造物は波動を流れに変換する機能を持つため、水粒子の水平速度成分が大きい静水面付近でその効果が著しいからである。

以上より、一般に有脚式構造物では、 h_2/h を大きくするほど消波効果の面で有効であるが、パイプ式のように波動を流れに変換する構造物では、例外的に h_2/h を比較的小さくできることが明らかである。

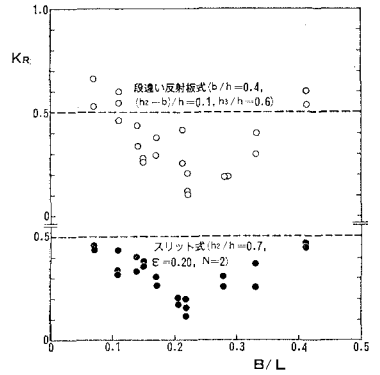


図-8 遊水部を持つ構造物の K_R と B/L の関係

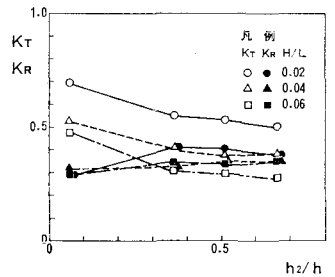


図-9 パイプ式構造物の K_T, K_R と h_2/h の関係

4. 理論的考察

4.1 エネルギー損失の小さい構造物

入射波のエネルギーが吃水深 h_2 以浅 ($-h_2 \leq y \leq 0$) では反射、 h_2 以深 ($-h \leq y \leq -h_2$) では透過されると考える。入射波および透過波の1周期分の平均エネルギーを $\bar{E}_I$ 、 $\bar{E}_T$ とすれば、 K_T および K_R は次のように表わされる。

$$K_T = \sqrt{\frac{\bar{E}_T}{\bar{E}_I}} = \frac{\sqrt{2kh(1-h_2/h) + \sinh 2kh(1-h_2/h)}}{\sqrt{2kh + \sinh 2kh}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_R = \sqrt{1 - K_T^2} = \frac{\sqrt{2kh(h_2/h) + \sinh 2kh - \sinh 2kh(1-h_2/h)}}{\sqrt{2kh + \sinh 2kh}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

このタイプに属する構造物の中から代表的に空気調圧

式を例にとり、実験値と計算値とを図-10で比較する。これによると、 K_T および K_R の実験値、計算値の変化は同じ傾向を示すが、 K_T の実験値は全体的に計算値よりも低い、この理由として、計算においてはエネルギー損失を無視しているのに対し、実際には構造物下端で剝離による渦の発生があり、これによって波のエネルギーの損失が生じているためと考えられる。

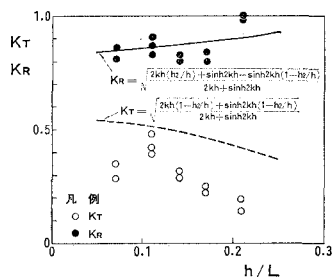


図-10 空気調圧式構造物の K_T , K_R と h/L の関係

図-10 空気調圧式構造物の K_T , K_R と h/L の関係

4.2 乱れによるエネルギー損失の大きい構造物

乱れによるエネルギー損失の大きい構造物については、構造物内部を通過する波のエネルギーの一部が抗力仕事により損失されると考えれば、 K_T は次式で表わされる⁵⁾。

$$K_T = \frac{\sqrt{1-K_R^2}}{1+C_D' \cdot B/s' \cdot D/s \cdot H/L \cdot f'(kh, h_2/h)} \quad (3)$$

ここに、 C_D' : 構造物内部に仮定した断面 $s \times s'$ 、高さ h_2 の仮想柱体 1 本の抗力係数、 s' : 沿岸方向に測った柱の中心間隔、 D : 波の入射方向に直角な平面に投影した柱の幅、 s' : 波の入射方向に測った柱の中心間隔である。また、 $f'(kh, h_2/h)$ は次式で表わされる。

$$f'(kh, h_2/h) = \frac{4}{9} \tanh kh \left[1 + \frac{3}{\sinh^2 kh} - \frac{\sinh^3 kh(1-h_2/h)}{\sinh^3 kh} - \frac{3 \sinh kh(1-h_2/h)}{\sinh^3 kh} \right] \left/ \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \right. \quad (4)$$

式 (3) により K_T を計算するためには、 C_D' を決定しなければならない。ここでは、波力実験の結果より C_D' を逆算する方法をとった。スリット式の K_T と H/L の関係について、

実験に対応する kh の上、下限を仮定して式 (3) より求めた計算値と実験値を図-11に示す。これより、計算、実験結果ともに H/L の増加に伴う K_T

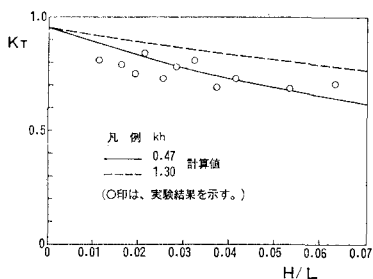


図-11 スリット式構造物の K_T と H/L の関係

の減少傾向はほぼ一致しているが、実験値は計算値よりやや低くなっていることがわかる。この原因として、計算ではスリット構造下部より発生する渦によるエネルギー損失が考慮されていないためと考えられる。以上より透水性構造物では、抗力仕事によるエネルギー損失を見積もることによって K_T を計算でき、 H/L の関数として表わせることがわかった。

また、式 (3) より K_T が B/L の増加に伴い減少することが容易に推察される。

最後に、空隙率が小さくなると透過率が低くなることについて考察する。透水性構造物は、多くの小部材から組み立てられている。図-3を参照すると、中詰式およびハイブリッド式の K_T は、平均的に見てスリット式や立体トラス式の K_T より低い。これは、主に空隙率の値が小さくなったことにより、 K_R が増加した分だけ K_T が低下したためと考えられる。ただし、ここでの空隙率の意味は、構造物の実質空間から構造物の実質体積を除いた部分の実質空間に占める割合を表わす。スリット式では遊水部を持ち、立体トラス式では部材が細く円板厚も薄いため、空隙率は約 0.9 となっている。これに対し、ハイブリッド式、中詰式の空隙率はそれぞれ 0.47, 0.69 である。したがって、ハイブリッド式および中詰式では、スリット式や立体トラス式に比べて空隙率が小さく、 K_R が増加した分だけ K_T は低下する。

次にスリット式と立体トラス式、あるいは中詰式とハイブリッド式の間隔を K_T の面から見ると、それぞれ後者の K_T が前者よりやや低くなっている。この理論的根拠は次のようである。透水性構造物の部材寸法が波高に比べて小さく、同時に空隙率が小さいと、部材の沿岸および入射方向の間隔 (s, s') が密になるので $B/s', D/s$ は大きくなる。結局、式 (3) において分母が大となり、 K_T は低くなる。

4.3 乱れ以外のエネルギー損失の大きい構造物

パイプ式は、複列水平板式構造物とほぼ同じタイプと考えられる。パイプ式の K_T , K_R と $\sigma^2 h/g$ の関係を図-12に示す。図中の曲線は、静水面に設置された 1 枚の水平板について、ポテンシャル理論により求めた理論曲線である⁶⁾。これより、実験結果と理論曲線の傾向は

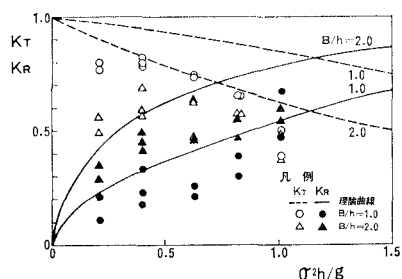


図-12 パイプ式構造物の K_T , K_R と $\sigma^2 h/g$ の関係

ほぼ同じであるが、実験値が理論値に比べて低くなっていることが分かる。この理由は次のとおりである。すなわち、パイプ式は波のエネルギーを流れに変換するため、波のエネルギーが損失されるが、ポテンシャル理論においてはこの損失が無視されていることによる。

5. 消波構造物の分類

これまでの検討から得られた結果をまとめると表-1のとおりである。まず、 K_T に着目すると、 H/L に大きく依存するものと、 h/L に強く依存するものの2つのグループに分けられる。前者は透水性を有し、主に乱れによるエネルギー損失の大きい構造物である。また、このグループの K_T は、 B/L が大きくなるにつれて減少する。一方、後者のグループでは、空気調圧式に代表されるように、エネルギー損失が小さく、 K_T は B/L にほとんど無関係である。ただし、例外としてパイプ式のように波動を流れに変換する構造物では、幅が大きくなると波としてのエネルギーを減衰させる効果がさらに高まるため、 K_T は B/L が大きくなるとともに減少する。 K_R については、次のようである。遊水部を持たない構造物の K_R は h/L に依存する。一方、遊水部を持つ構造物では、 K_R は B/L に依存する。

結局、8種類の構造物を消波機能別に分類すると次のとおりである。

表-1 各種構造物の消波効果に影響を及ぼす要因

消波効果 構造物名称		K_T		K_R	
		波浪条件	形 状	波浪条件	形 状
有脚式構造物	中 詰 式	H/L	B/L	h/L	—
	ハイブリッド式	H/L	B/L	h/L	—
	立体トラス式	H/L	B/L	h/L	—
	スリット式	H/L	B/L	—	B/L
	段違い反射板式	h/L	—	—	B/L
	空気調圧式	h/L	—	h/L	—
	パイプ式	h/L	B/L	h/L	—
潜堤	チューブ式	H/L	B/L	h/L	—

- 1) 空気調圧式、段違い反射板式：エネルギー損失が小さい。
- 2) スリット式、立体トラス式、中詰式、ハイブリッド式、チューブ式：乱れによるエネルギー損失が大きい。
- 3) パイプ式：波動を流れに変換することによる波エネルギー損失が大きい。

6. 結 論

本研究より得られた成果をまとめると次の通りである。

- 1) 消波構造物を消波効果と波浪条件および構造物形状寸法の関係から大きく分類すると、①エネルギー損失の小さい構造物、②乱れによるエネルギー損失の大きい構造物、③波を流れに変換することによる波エネルギー損失の大きい構造物の3つのグループとなる。
- 2) 各グループに対して第一に着目すべきパラメータは、① h/L 、② H/L および B/L 、③ h/L および B/L である。
- 3) ①および②のグループに属する構造物では、 h_2/h を大きくすると K_T が低下し、 K_R が増加する。在来の離岸堤と同等の消波効果を期待するためには、 $h_2/h=0.7$ とする必要がある。これに対し、③に属する構造物では、 $h_2/h=0.3$ と小さくできる。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・村井嶺美・松尾和男・藤原隆一：海域制御構造物に関する実験的研究，土木技術資料，Vol. 29, No. 2, pp. 9~14, 1987.
- 2) 尾崎 晃：消波構造論，1965年度水工学に関する夏期研修会講義集，B海岸港湾コース，pp. 1~26, 1965.
- 3) 宇多高明・小俣 篤：人工リーフの波浪減衰機能と海浜流場の形成に関する考察，土木技術資料，Vol. 28, No. 2, pp. 32~37, 1986.
- 4) 近藤俊郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，p. 275, 1983.
- 5) 高山知司・菊地 治・西田一彦：大型浮遊構造物による波の反射および透過に関する模型実験，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 466~470, 1979.
- 6) 井島武士：海岸工学，朝倉書店，p. 315, 1970.