

広周波数帯域にわたって低反射機能を有する直立消波工の開発

角野昇八*・小田一紀**・重松孝昌***・芳田利春****

1. 緒 言

開口部を有する前面板およびその背後の不透過壁を主要構成要素とする直立消波工の消波機能（低反射機能）についての実験的あるいは理論的研究は既に数多くなされている。いずれの研究から、この種の構造物の反射率は波の周期（周波数）に大きく依存し、低反射機能は捨石堤などとは異なって特定の周期を含むごく狭い周期帯でしか期待できないことが知られている。それゆえ、気象条件に応じてさまざまな周期の波に遭遇する実海域を考えれば、この種の消波工はまだこのような点で十分な消波機能を有しているとは言えず、したがって、波の周期にできるだけ依存しないで広い周期帯にわたって低反射機能を有するような直立消波工の開発が待たれているところである。

本研究は、直立消波工の消波のメカニズムおよび波動論の知識に基づき、従来より広い周期帯において低反射機能を有する直立消波工の開発を目ざしたもので、本論ではその新しい直立消波工の形式を提案するとともに、得られた模型実験の結果について報告する。

2. これまでに得られた知見

著者らは、現在までに、縦スリットの前面板を有する直立消波工の反射率などの各種水理量を比較的簡単に算定できる理論式を提示したが¹⁾、その後さらに精度よく算定するために若干理論を修正した²⁾。この理論によれば、例えば反射率の理論式は式(1)のように表される。ただし式中、 $k=\pi/L$ 、 L ：波長、 C ：blockage coef. (理論

定数)、 $2a$ ：スリット幅、 D ：隣接柱体中心間隔、 l ：消波室幅、 H ：波高、 h ：水深である。また、 δ は柱列（前面板）の厚みの影響を表す量であって角柱列の場合、

$$\delta = \frac{\pi}{6} b \left(1 - \frac{2a}{D} \right) \dots\dots\dots (2)$$

と表される（ b は角柱の波向き方向の辺長）。さらに、 C_s は線形損失係数であり、非線形の損失係数 f とは式(3)で関係づけられている。ここで、式中の γ は式(4)で表される量である。式(1)による反射率の算定は、前面板の断面形状諸元を与える諸量の他、前面板が角柱列で構成されている場合は式(3)の損失係数の値を $f=1.5$ と与えることによって算定することができる。

図-1は、正方形断面角柱列の前面板をもつ直立消波工に関して、式(1)によって算定される反射率の理論曲

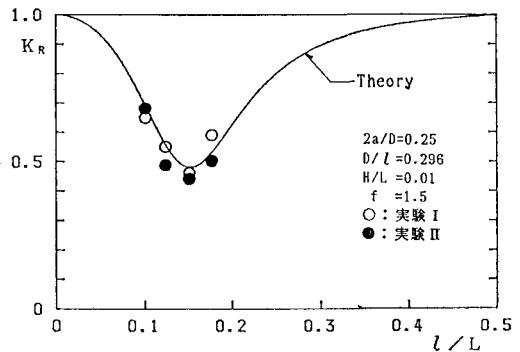


図-1 在来型直立消波工の消波特性

線と実験値との比較の一例を、横座標に相対消波室幅(l/L)をとって示したもので、図中の実線が理論曲線を

$$K_R = \sqrt{1 - \frac{4kC_s^2(1 - \cos 2k(l - \delta))}{2k^2((C + \delta)^2 + C_s^2)(1 - \cos 2k(l - \delta)) - 2k(C + \delta) \sin 2k(l - \delta) + 1 + 2kC_s^2(1 - \cos 2k(l - \delta))}} \dots\dots\dots (1)$$

$$f = \frac{9\pi(2a/D)^2(\sinh 2kh + 2kh)}{4(\sinh^2 kh + 3)} \frac{1}{\gamma} \frac{L}{H} \frac{D}{L} \frac{C_s^2}{D} \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2(1 - \cos 2k(l - \delta))}{2k^2((C + \delta)^2 + C_s^2)(1 - \cos 2k(l - \delta)) - 2k(C + \delta) \sin 2k(l - \delta) + 1 + 2kC_s^2(1 - \cos 2k(l - \delta))}} \dots\dots\dots (4)$$

表している（ただし $f=1.5$ ）。図中の実験値は、一辺5 cm および 20 cm の正方形断面角柱からなる前面板をもつような、すなわちスケールが4倍異なる2種類の模型

* 正会員 工博 大阪市立大学講師 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科
 **** 正会員 工修 東洋建設(株)

を用いた実験による値を示している³⁾(ただし、前者の実験〔実験Ⅰ〕は、水深 0.5 m、長さ 50 m の造波水槽で、後者〔実験Ⅱ〕は、水深 2.0 m、長さ 100 m の造波水槽で行った)。図によれば、実験値と理論値との一致の程度は非常に良好であって、本理論の妥当性が示されている。同時に、両実験値と理論曲線の一致の程度が良いことより、この縮尺変化の範囲内では縮尺効果は存在しない、あるいは存在したとしても無視しうる程度であることが示されている。

ところで、式(1)から明らかなように、式中の $f=C_g \approx 0$ として、すなわちスリットにおける損失が全く無いものとして反射率を算定すれば、波の特性や構造物諸元の如何にかかわらず常に $K_R=1$ を得る。したがってこのことより、この種の消波工の消波のメカニズムは開口部における波のエネルギー損失によるものであることを結論づけることができ、消波工の消波機能を高めるためには開口部におけるエネルギー損失をいかにして増すかという観点から研究に取り組みばよいことがわかる。

式(1)からはこの他にも、前面板の角柱断面の諸元を変化させることによる反射率の特性の変化も算定できるが、それによれば、ある任意の消波室幅を有する消波工において前面板の厚みを増せば、反射率が最小となる波の周期を長周期側にずらすことができ、逆に減らせば短周期側にずらすことができることが明らかにされる。このことは既に、岩垣・榎木⁴⁾によっても、また実験的にも明らかにされている。

3. 新型消波工の提案断面

前述の知見によれば、一般に消波工の消波機能を高めるためには開口部におけるエネルギー損失の程度を大きくすれば良いことになるが、そのためには、i) 開口部通過水粒子速度をできるだけ大きくするか、あるいは ii) 開口部通過の際のエネルギー損失の係数を大きくすればよいとの結論に到達する。

いま、前面板の水平断面の形状諸元を見直すことによって上記の i) を達成しようとするとき、開口率を小さくすればそれをなすことができる。しかしそのようにしても、図-1 に示されるような反射率の特性は、反射率の値が小さいところではより小さくできるものの、反射率の値が大きいところでは逆に大きくなってしまいが式(1)より示される。また、開口率を小さくすることは開口部の寸法を小さくすることでもあり、これはケーソンの施工上の観点から望ましいことではない。また、i)ではなく、ii)を達成しようとしても角柱よりも一層大きい損失係数を与える実用的な断面形状は現時点では見あたらない。

結局、前面板の水平断面の形状諸元を変化させても消

波機能の著しい改善は望めず、現実的には、鉛直断面の形状諸元を見直すことによってしかなされえないことが理解されよう。

以上のような直立消波工の消波のメカニズムに関する考察に加えて、表面波の水粒子運動は短周期の波ほど水面付近に集中し、逆に長周期の波ほど水深方向に一様になる傾向があることを考慮すれば、広い周期帯にわたって低反射機能を期待できる直立消波工として図-2 に示すような3種類の構造形式を提案することができる。すなわち、いずれも前面板の上部構造は従来通りの断面形状と配置で、波動運動が主として水面付近に存在する短周期波を対象とするが、その下部は、形式Ⅰでは上記の知見を考慮して前面板の厚みを増すことによって、また形式Ⅱでは、消波室内を含めた部分を不透過構造として前面板の開口部を上部に集中させることにより、水底付近にも波動運動がある長周期波の水粒子運動を鉛直断面方向に縮流させて開口部通過水粒子速度の効果的な増大

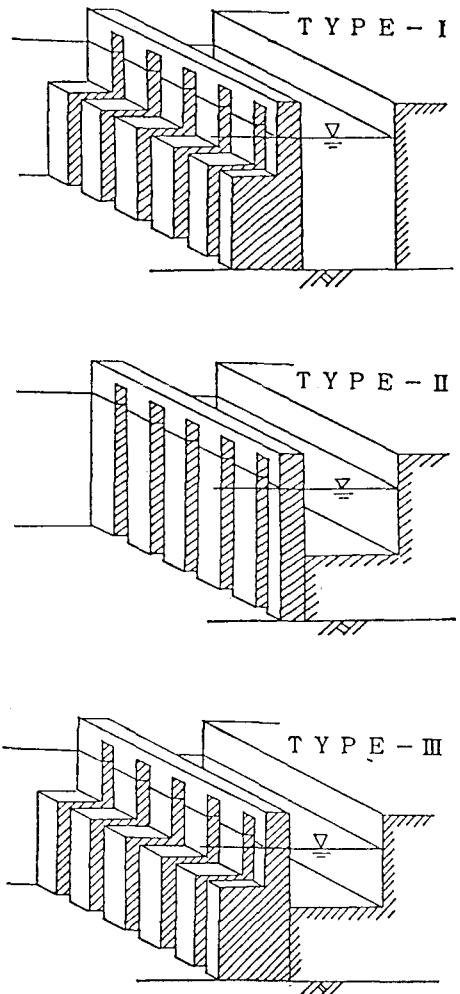


図-2 提案断面

を図るようにしたものである。形式Ⅲはこれらの形式を組み合わせた構造としている。なお、これら形式ⅠあるいはⅢにおける前面板下部の厚みを増した部分の形状は、図に示すようなステップ状ではなく、上部から下部にしたがって厚みを漸増させるような形状でもよく、また、消波のメカニズムを考えれば開口部の形状は縦スリットの他、横スリットや丸孔でもよい。

4. 実験結果

実験は、大阪市立大学工学部土木工学科・水理実験場内に昨年度新設された大型2次元波浪水槽を用いて行った。この実験水槽の長さは100m、幅3m、高さ3mで、造波装置は規則波だけでなく不規則波も造波することができるが、今回は規則波を対象として実験を行った。水深は $h=2$ mで一定とし、模型は造波板から約70m離れた地点に設置した。模型（形式Ⅲ）の設置状態の写真を図-3に示す。

模型の前面板は一辺長が0.2mの鉄製の正方形断面角パイプからなる縦スリットの開口部をもつもので、背後の不透過壁は耐水ベニヤ板で製作した。

また、前面板を固定するために、水路底と模型との間には0.15mの隙間が生じるが、木材で塞いで前面板下部から消波室内に波が侵入しないようにした。

模型の前面板の下部の厚みの増し方は、図-2中の形式Ⅰのようにステップ状とした。このステップ部分は、長さ0.6m（波向き方向）、幅0.2m（波向き直角方向）、高さ0.4mの鉄製の箱を製作し、これを前面板の沖側に1段～3段に重ねて取り付けることによって形成した。したがって、前面板下部の厚みは全体で0.8mであり、また水底からのその高さは0.55m、0.95m、1.35mで、水深に対する比は $q'=0.275$ 、0.475、0.675となる。

消波室内下部の底上げ部分は、幅（波向き直角方向）1m、高さ0.2mの鉄製の箱を製作し、これを消波室内に3段～5段積み重ねることによって形成し、波によ

てロッキングを起こさないように固定した。このようにして、消波室内の底上げ部分の水底からの高さを、0.75m、0.95m、1.15mのように変化させたが、水深に対するその比は $q=0.375$ 、0.475、0.575となる。形式Ⅲの模型は形式Ⅰおよび形式Ⅱで用いた箱状模型を組み合わせる製作した。

以上のように、模型断面を種々変化させて所期の目的を最も効果的に達成できるような消波工断面を探るよう努めた。なお、スリット部の開口率は $2a/D=0.25$ 、消波室幅は $l=0.9$ mで共に一定とした（ただし、形式Ⅰや形式Ⅲの消波室幅は背面不透過壁前面から前面板上部の中心線までの長さとする）。周期は $T=1.60$ sec～5.02secの範囲で9種類とし、波形勾配が $H/L \approx 0.01$ 、0.02、0.03となるように波高を調節した。反射率の測定は、長さ90cmの容量式波高計2台を模型からおおよそ15m沖側に0.9m離して設置し、入・反射波の分離推定法⁵⁾により算定した。

(1) 形式Ⅰ

図-4は、前面板下部の厚みを増した部分の高さを变化させた場合の反射率の実験結果を横軸に相対消波室幅(l/L)をとって示したものである。ただし、この場合の波形勾配は $H/L \approx 0.01$ である。図中の曲線は、この形式の前面板の上部断面が水底まで達するような在来型の縦スリット直立消波工に対して、式(1)より求められる反射率の理論値を表したものである。図より、在来型の直立消波工の反射率が最小値を示す相対消波室幅(l/L)_pより短周期側（図の右側）では実験結果は在来直立消波工の理論値とよく一致するが、それより長周期側では（同左側）実験値が理論値を下回り、またそれは、厚みを増した部分の高さが高くなるほどより大きくなる傾向があることがわかる。この場合、(l/L)_pの値も在来型のそれと同じであり、したがってこの形式Ⅰの直立消波工断面によれば、在来型消波工の短周期の波に対する消波特性を損なうことなく、長周期の波に対して在来型よりも優れた消波特性を得ることができる。



図-3 模型の設置状況

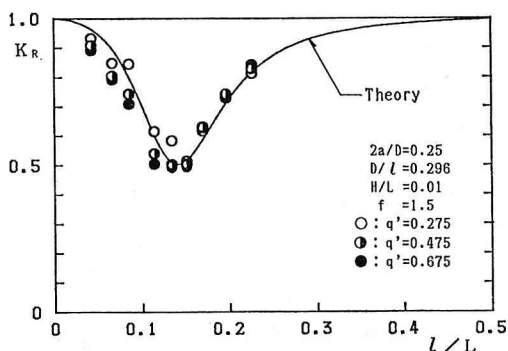


図-4 形式Ⅰの消波特性

(2) 形式 II

図-5 に形式 II についての $H/L \approx 0.01$ の条件における実験結果を示す。図中の曲線は既述の在来型の縦スリット直立消波工の反射率の理論値である。この場合にも、在来型消波工の $(l/L)_p$ より短周期側における実験値と理論曲線との一致の程度は良好である一方、長周期側では、実験値は在来型直立消波工の理論値を下回っていることがわかる。また、その程度は形式 I よりも大きく、底上げの高さを高くするほど効果が大きい。

以上に示したように、形式 I および形式 II とも、水底付近まで波動運動のある長周期波の水粒子運動を鉛直方向に縮流させることによって、開口部を通過する水粒子速度を増大させてエネルギー損失量を増大させ、ひいては反射率を小さくしようとする所期の目標を達成していることがわかる。

図-5 に示される形式 II の反射率の特性を見るとき、既述の $(l/L)_p$ の値が在来型直立消波工と比べて長周期側(図の左側)に現れることが示されている。 $(l/L)_p$ が長周期側にずれることを式(1)を通して解釈するとき、それは式中の blockage coef. C の値が増加するということの意味し、また、反射率が小さくなることは通常、損失係数の値が大きくなることを意味している。 C は慣性抵抗を表し、また f はスリットにおける渦の発生にともなう乱流抵抗を表すものであるため、消波室内の水深を小さくすることは、長周期の波に対してこれら両者の抵抗を増加させる効果があることがわかる。

なお、谷本・吉本⁶⁾もこの形式 II と同様の縦スリット直立消波工の模型を用い、その消波特性に関して実験的研究を行っている。それによると、本研究と同様、消波室内の底上げ部の高さを高くすれば反射率は低くできることは指摘されているものの、 $(l/L)_p$ の値が長周期側にずれることは指摘されていない。

(3) 形式 III

形式 I を用いた実験結果からは前面板の厚みを増した部分の高さを高くする程、また形式 II を用いた実験結果

からも消波室内の底上げ部分の高さが高くなるほど長周期の波に対する消波効果が大きくなることがわかった。そこで、形式 III の断面として、厚みを増した部分の高さを水深に対して $q' \approx 0.675$ に、また消波室内の底上げ部の高さを水深に対して $q = 0.575$ として実験を行った。図-6 にその $H/L \approx 0.01$ の場合の実験結果を示す。この図によると、形式 I および形式 II の実験結果と同様に、短周期側では実験値と理論値は良好な一致を示す一方、長周期側では実験値は理論値を大きく下回っている。その程度は形式 I よりはもちろん、形式 II と比べても一層大きい。このことより、この形式 III の消波工の場合には、提案の 3 形式の中で最良の消波効果を呈しており、形式 I と形式 II の消波効果が相乗的に現れていることが理解される。

次に図-7 は、この形式 III (q' および q の値は同じ)の消波特性に波形勾配が及ぼす影響をみたものである。図中には対応する在来型直立消波工の反射率の理論曲線も示した。図によれば、短周期領域では在来型と同様、波形勾配が大きくなるにつれて反射率が低下する傾向を示し、またその値も在来型とほぼ同じである。一方、長周期領域では在来型よりも反射率が小さくなるのは既述の通りであるが、波形勾配の影響は短周期領域の場合ほど大きくは現れず、波形勾配によらずほぼ同じ反射率を

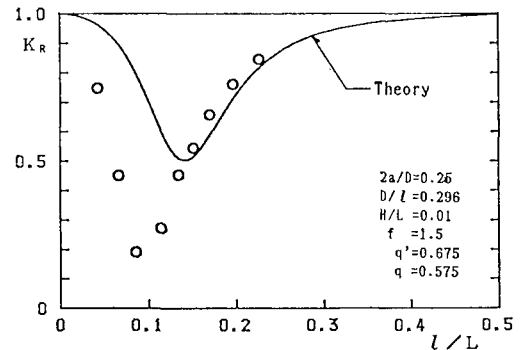


図-6 形式 III の消波特性

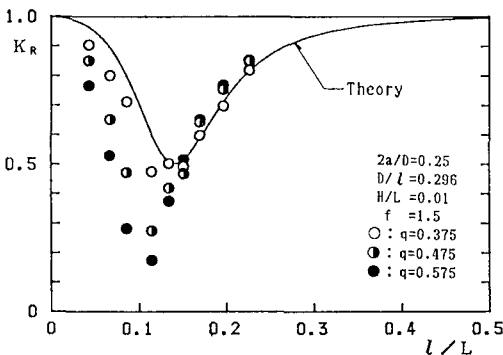


図-5 形式 II の消波特性

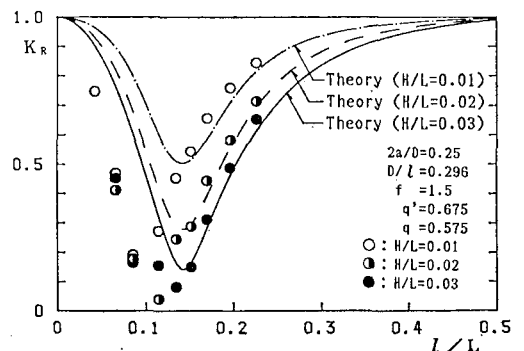


図-7 波形勾配の影響

示しているのがわかる。

5. 結 言

以上に見てきたように、新しく提案の直立消波工は従来の直立消波工と比べて、短周期の領域では消波機能はほぼ同じである一方、長周期側ではより良好な消波機能を有していることが明らかとなった。

いま、本実験で対象とした形式Ⅲ（ステップ部の高さ：1.35 m、消波室内底上げ部の高さ：1.15 m）の直立消波工の模型の縮尺を $n=1/5$ と考えるとき、その現地寸法は以下に示すような値になる。

消波室幅： $l=4.5$ m

前面板上部断面：1 m×1 m の正方形断面角柱

前面板下部断面：1 m（波向き直角方向）×4 m（波向き方向）×6.75 m（厚み増加部の高さ）

消波室内底上げ部の高さ：5.75 m

設置水深：10 m

図-8 は、この直立消波工の 図-7 に示される $H/L \approx 0.01 \sim 0.03$ の波浪条件での反射率を模型縮尺 $n=1/5$ として現地周期の関数として表現しなおしたものである。図中には、在来型の直立消波工の同じ波浪条件のもとにおける反射率の理論値も示した。この図によれば、ここに提案の形式Ⅲの断面は従来の直立消波工に比べて、長周期側で反射率が大きく低減している様子が示されている。また、そこでは波形勾配の影響は在来型のように強くは受けていない。いま仮に、 $K_R \leq 0.4$ を消波機能良否の一応の目安とし、さらに $T=4$ sec 程度の短周期の波では波形勾配の大きな波のみを専ら消波の対象とするであろうことを考慮すれば、目標の消波機能は従来型では $T=4$ sec $\sim$ 5 sec 付近のみでしか達成されていないのに対して、この形式では $T=4$ sec $\sim$ 8 sec 弱までの広い周期帯にわたって達成されていることがわか

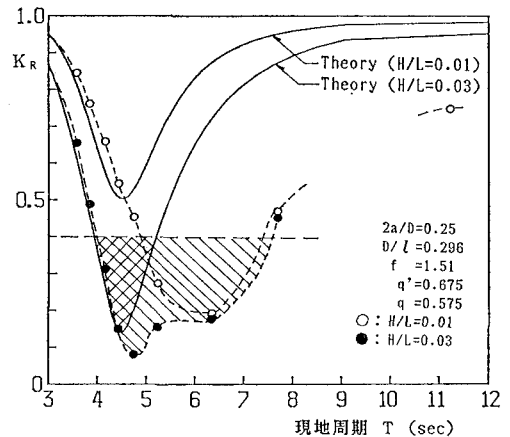


図-8 消波特性の在来型直立消波工との比較

る。したがって、従来の直立消波工のようには入射波の周期によって消波特性は大きく左右されずに、かなり広い周波数帯域にわたって低反射機能が実現できる直立消波工を提案できたものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 角野昇八・小田一紀・村本哲二・芳田利春：複素係数の blockage coef. を導入した漸近展開接合法——スリットにおけるエネルギー損失量の評価——，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 407～411，1986。
- 2) 大東秀光・角野昇八・小田一紀・芳田利春・村本哲二：二重壁式縦スリット直立消波工の消波機能に与える構造形式の影響，土木学会第42回年次学術講演会講演概要，pp. 558～559，1987。
- 3) 角野昇八・小田一紀・重松孝昌・玉木 博・芳田利春：縦スリット直立消波工の消波特性のスケールエフェクトについて，土木学会第43回年次学術講演会講演概要（印刷中），1988。
- 4) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸工学，共立出版，463 p.，1979。
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，28 p.，1976。
- 6) 谷本勝利・吉本靖俊：スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 389～393，1982。