

ひし形断面柱体の列を前面板にもつ消波工の消波特性

Wave Reflection from a Slit-type Breakwater having Diamond-shape Cylinders as a Front Wall

角野昇八^{*}・仲田義弘^{**}・藤原隆一^{***}

Shohachi Kakuno, Yoshihiro Nakata, Ryuichi Fujiwara

Wave reflection from a slit-type breakwater having diamond-shape or circular-shape cylinders as a front wall is obtained theoretically and experimentally. A method of a previous study where the matched asymptotic expansions was employed is used. The blockage coefficient for the diamond-shape cylinders which has not been gotten yet is obtained by using the Boudary Integral Method(BIM). The value of the energy loss coefficient for the cylinders is decided after comparison of theoretical values with experimental data. The reflection coefficients for the slit-type breakwater with diamond-shape and circular-shape cylinders calculated from the present method agree with experimental data, as are those for the one with square cylinders. The difference in the characteristics of the reflection coefficients of a slit-type breakwater having diamond-shape, circular-shape, and square-shape cylinders is discussed.

KEY WORDS : reflection, slit, breakwater.

1. 緒言

水深60mの大水深域に築造の釜石防波堤前面に消波工が設けられていることにみられるように、今後の海洋開発においても消波工の設置の必要性、あるいはそれに伴う施工の事例はますます増えることと思われる。

従来、スリット式の直立消波工の前面板は、断面の一边を防波堤法線に平行に設置した縦ないし横の角柱の列からなるのが通例であった。この理由は、設計・施工が容易であることの技術的な特長のほかに、水理学的な特長として隅角部における渦の剝離にともなう大きなエネルギー損失が期待できることが挙げられる。しかるに、ひし形の角柱列であってもその大きな値が期待できるはずであり、したがってその反射率がどのような特性を示すかは水理学的に大いに興味のあるところである。一方、景観上の観点からは、ひし形角柱列の方が単なる角柱列よりもむしろよりよい印象を与えるであろうことが期待できる。また、これと同様に円柱列の前面板をもつ直立消波工も景観上の観点から検討価値のある断面と考えられ、その水理特性を知ることは重要なことであると思われる。

このような観点にたって本研究は、ひし形柱体列および円柱列の前面板をもつ直立消波工を検討対象の断面とし、その水理学的特性を理論的および実験的に解明して検討をくわえるとともに、それを従来の角柱断面柱体列の直立消波工と比較し、さらにはこれら3者に工法的あるいは景観的観点からもみた若干の評価もくわえたものである。

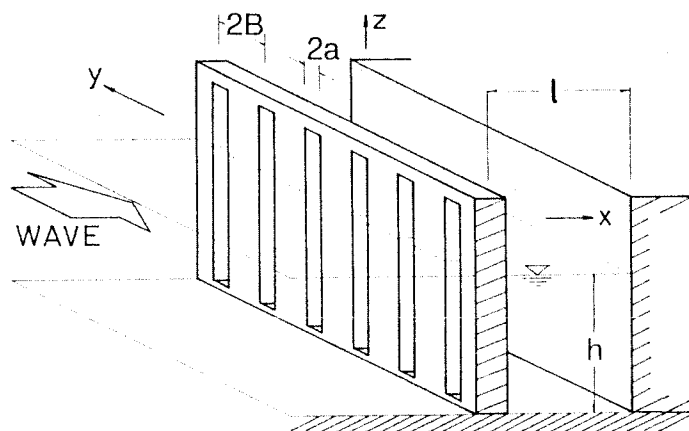


図-1 縦スリット直立消波工概念図

*正会員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本3-3-138

**学生員 大阪市立大学工学部

***正会員 東洋建設㈱

2. これまでの研究経過

著者らは、図-1に示すような縦スリット直立消波工の反射率を理論的に評価するために、背面不透過壁のない柱体列のみによる波の透過と反射現象の解析より研究を始めた。理論¹⁾の概要は、全領域を柱体列より離れた外部領域と柱体列近傍の内部領域に分けて漸近展開接合法を適用して解析するものである。その際、全領域の支配方程式である2次元のヘルムホルツの方程式は外部領域のみに考え、内部領域ではヘルムホルツの方程式中の一項を省略した2次元のラプラスの方程式を課していた。内部領域において支配方程式中の一項を省略することによるわずかの理論的誤差は、従来の手法では得られた解析結果の式に補正項を付加し、それを既往の別の理論や実験値と比較することによって評価して、最終的に実用上問題のない結果を得ていた。しかるに最近、摂動法の手法を導入することによってこの不確定さを払拭することができ、従来の理論に理論的裏付けのある補正摂動項をくわえて理論をより厳密なものにすることができた²⁾。これに引き続き、柱体列の背後に不透過壁がある直立消波工形式の構造物に対しても同様の手法を適用して検討をくわえている³⁾。これらの結果によれば、柱体列のみの場合には理論的補正項は多少の影響量を有するものの、背面に不透過壁のある縦スリット直立消波工の場合にはその影響量は僅かであることが明らかとなった。図-2は、正方形断面の角柱列を前面板にもつ直立消波工の反射率を摂動項をくわえない理論（実線）と第2次摂動項までをくわえたもの（一点鎖線）によって相対消波室幅 l/L （ L は波長）の関数として描いたものを実験値と比較したものである。両理論値の間の差は僅かであり、くわえて両理論値は実験値とよく一致していることが示されている。それゆえ、摂動項をくわえない理論によっても直立消波工の反射率を十分な精度で算定できることが明かにされたことになる。

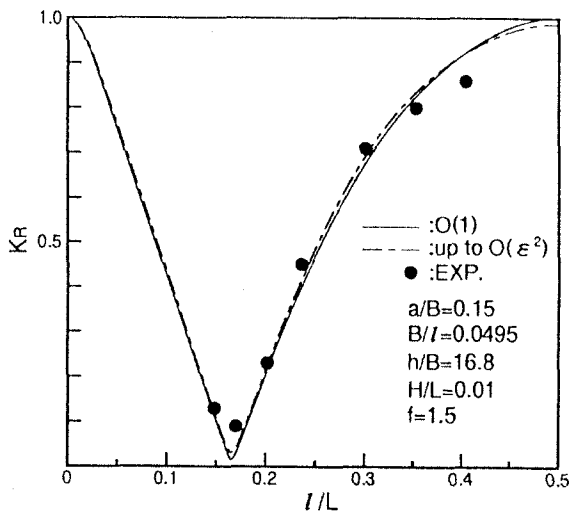


図-2 正方形断面角柱列の前面板をもつ
直立消波工の反射率

3. 縦スリット直立消波工の反射率

3. 1 縦スリット直立消波工の反射率

本理論によれば、摂動項をくわえない縦スリット直立消波工の反射率 K_R は以下の式によって表すことができる。

$$K_R = \left| \frac{-ikC[1 - \exp(2ikl)] + \exp(2ikl)}{1 - ikC[1 - \exp(2ikl)]} \right| \quad (1)$$

式中、 i は虚数単位、 k は波数であり、また C は

$$C = C_R + iC_I \quad (2)$$

である。 C_R は閉塞係数(blockage coefficient)とよばれ、列の慣性抵抗を表す係数であり、断面形状が与えられれば純理論的に決定することができる。また、 C_I は柱体間流速の1乗に比例する形の抵抗の係数であり、同流速の2乗に比例する形のエネルギー損失の係数 f とは以下の式で結びつけられている。

$$\frac{C_I}{B} = \frac{4}{9\pi} \frac{\sinh^2 kh + 3}{(a/B)^2 (\sinh 2kh + 2kh)} \left\{ \Gamma + \frac{L}{B} \frac{H}{L} f \right\} \quad (3)$$

ここに、 h は水深、 H は波高、 a と B はそれぞれ開口幅と柱体間隔の $1/2$ （したがって a/B は開口率）であり、 Γ は以下に表される。

$$\Gamma = 1 / \{ 1 - ikC[1 - \exp(2ikl)] \} \quad (4)$$

以上より、断面形状が与えられれば C_R が理論的に算定され、この値と実験的に決定される f を知ることによって反射率を求めることができることになる。この際、 C_R 、 f とも柱体列の背後の不透過壁の有無にかかわらず同じ値を用いることができることを付記しておく。なお、角柱列および円柱列、平板列の C_R については既に解の形が求められており¹⁾、また、同断面に対する f の値も既に求められている²⁾。

3. 2 ひし形断面角柱列の閉塞係数と損失係数⁴⁾

まだ解が求められていないひし形断面の角柱列の C_R は、解析的な算定が困難なために既発表の境界積分法の数値計算手法⁵⁾によって正方形断面のひし形を対象として求めた。手法の適用にあたっては、柱体列の沖側、岸側に対してそれぞれ $6B$ の長さで列方向に B の幅の領域をとり、境界周辺長を計208分割した。計算では、閉塞物より沖側、岸側にそれぞれ $3B$ 離れた地点では流れは一樣となっていることを確認している。図-3に、得られた閉塞係数を B で無次元化したものを開口率 a/B の関数としてほかの柱体列に対する値とともに示した。ひし形角柱列の閉塞係数は（したがってその慣性抵抗も）、正方形断面角柱列や円柱列のものよりかなり小さく、円柱列と平板列のほぼ中間の値をとることがわかる。

円柱列に対しては $f = 0.75$ 、また角柱列に対しては $f = 1.50$ が著者らの研究において既に損失係数として適当とされている値である。値が不明のひし形角柱列に対しては、図-3に求められたひし形に対する C_R の値を代入した柱体列のみの透過率、反射率に対する著者らの理論計算式²⁾において、損失係数の値を円柱相当値の $f = 0.75$ から角柱列相当値の $f = 1.50$ まで変化させた理論値が中村の同断面の実験値⁶⁾にもっとも合致する f の値を逆算して求めた⁴⁾。その結果によれば、この範囲内の f 値の変動による計算結果の変化は僅かであり、また多少のパラッキもみられたものの、 $f = 1.00$ が妥当な値を与えるようであった。すなわち、ひし形角柱列では、 C_R は正方形断面角柱列や円柱列よりかなり小さい値をとるのに対して、損失係数の値は角柱列と円柱列の中間の値をとることが明かとなった。

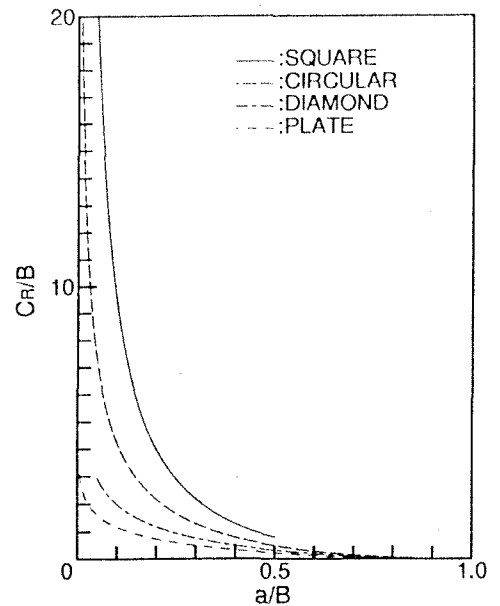


図-3 各種断面の C_R/B の比較

4. 実験

以上の手法より算定される直立消波工の理論反射率のうち、前面板が正方形断面角柱列からなるものについてはその妥当性は既に検証されている（図-2）。前面板がひし形角柱列および円柱列からなるものについてもその妥当性を検証するために実験をおこなった。実験は、長さ20m、幅0.5mの造波水槽において水深を30cmとして規則波を用いて行った。模型は造波板より約15mの地点に設置し、反射率は模型よりほぼ3.5m沖合いの2台の波高計より入・反射波分離法によって求めた。実験の条件と結果を示せば表-1のようである。

表-1 柱体列諸元と実験条件および結果

ひし形角柱列			円柱列		
正方形一辺長 (cm)	2.5		直径 (cm)	2.7	
隣接柱体間隔 2B (cm)	4.1		隣接柱体間隔 2B (cm)	3.5	
開口幅 2a (cm)	0.70		開口幅 2a (cm)	0.70	
開口率 a/B	0.17		開口率 a/B	0.20	
消波室幅 l (cm)	19.3		消波室幅 l (cm)	20.0	

周期 T (sec)	波高 H (cm)	反射率 K _R	周期 T (sec)	波高 H (cm)	反射率 K _R
0.65	0.78	0.51	0.65	0.79	0.66
	1.50	0.39		1.33	0.49
	2.10	0.34		2.01	0.34
0.80	0.82	0.28	0.80	1.02	0.47
	2.40	0.06		2.20	0.26
	3.60	0.08		2.70	0.21
1.30	1.80	0.56	1.30	1.75	0.72
	2.90	0.58			

5. 各種前面板をもつ縦スリット直立消波工の反射率の比較

5. 1 実験値との比較

図-4にひし形角柱列の前面板をもつ直立消波工の反射率の理論曲線と実験値を波形勾配別に相対消波室幅の関数として示した。ただし反射率の実験値は、比較対象の波形勾配の値のところまで内挿あるいは外挿した値を用いた。図に示されるように、理論値と実験値は反射率にして最大15%程度のズレがみられるものの、全般にほぼ合致していることが認められ、 C_R および f の値を含めた本手法の妥当性が示されている。図-5は円柱列についての図である。この場合にも、ひし形角柱列の場合と同様に本手法の妥当性が示されている。なお、このようにして求められる f の値は、正方形断面角柱列において、一辺長が少なくとも5 cmのものと20 cmのもの間（スケールが4倍異なる）では縮尺効果はみられないことが明らかになっている⁷⁾。

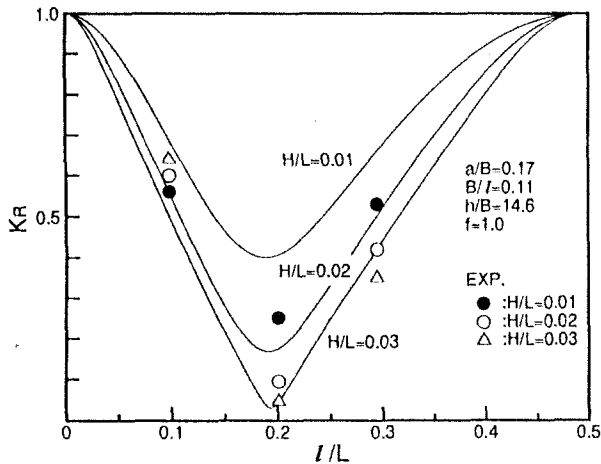


図-4 ひし形断面柱列の前面板をもつ直立消波工の反射率

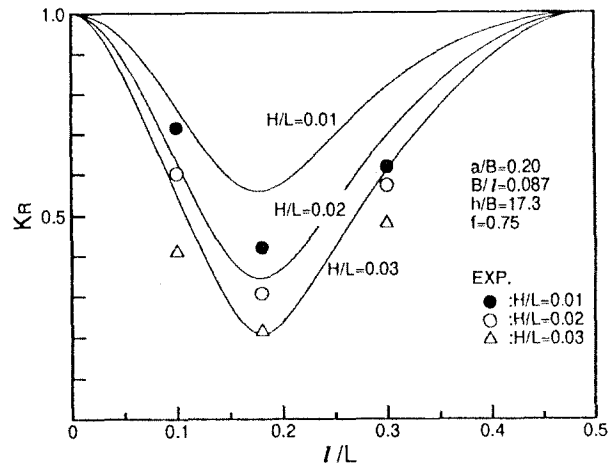


図-5 円柱列の前面板をもつ直立消波工の反射率

5. 2 反射率の比較

図-6(a)~(c)には、一辺長が1 mの正方形断面の角柱列（以下、正方形と称す）の前面板をもつ直立消波工について反射率を波形勾配および前面板の開口率別に相対消波室幅の関数として示したものである。また図-6(d)~(f)には、一辺長が0.5 mの断面の場合を示した。同様に、図-7(a)~(c)と図-7(d)~(f)はそれぞれ正方形断面と同じ投影面を持ち、一辺長が正方形のその約70%となっているひし形角柱列（以下、ひし形）の前面板の場合を示し、図-8(a)~(f)は同様に直径が1 mおよび0.5 mの円柱列に関する図である。スリットでのエネルギー損失が小さく、したがって f の値が小さな円柱列の場合でもかなりの消波効果が期待できるのが注目される。

これらの図全体より、まず反射率が最小値をとる相対消波室幅の値 $(l/L)_{min}$ に着目する。これは消波室幅の設計上重要な要素となる量である。この値は正方形がもっとも小さく、円柱列がそれに次ぎ、ひし形のものがもっとも大きい。もっとも、ひし形と円柱列の間の差は正方形と円柱列との間の差に比べて僅かである。この値の大小は柱列の慣性抵抗の大小、すなわち閉塞係数の大小に応じたものとなっており、正方形よりもそれが大きい波向き方向に縦長の矩形断面とすればこの傾向はますます著しいものとなる。以上より、同じ設計波長に対しては正方形断面のものが消波室幅はもっとも少なくすむことになるが、反射率が1以下となる領域の面積の観点でみれば、相対消波室幅の広範囲にわたって消波効果が現れるのはひし形であり、円柱列はそれより僅かに小さく、正方形はさらに小さく、傾向は逆となっている。なお、いずれの条件にでも $(l/L)_{min}$ が $1/4$ の値をとることはなく、多孔壁式直立消波工の特性⁹⁾⁹⁾と大きく異なっていることが注目される。

つぎに、各断面の最適の開口率についてみる。いま、仮に反射率 $K_R \approx 0.5$ を消波効果の有無の限界値の基準として、波形勾配による反射率の増減も考慮して最適の開口率をみれば、角柱列：0.1~0.25、円柱列：0.1~0.15、ひし形列：0.1~0.2となる。したがって正方形がもっとも広い有効開口率幅をもつことになる。またいずれの断面でも、以上の幅の中間の値の開口率としておけば、スリットの開口部分に海藻、貝類等が付着して開口率が減少しても、消波特性をむしろより良好とする影響を与えることがわかる。

一般に、現地での柱体の一辺長あるいは直径は1 mから50 cmの程度であろうと推察される。そこで、柱体径寸法の大小の影響をみると、いずれの断面でも寸法を大きくすることにより、 $(l/L)_{min}$ の値を小さくすることができることがわかる。

波形勾配の影響はかなりみられ、その変動によって反射率はかなり増減することがわかる。しかし、開口率を既述の最適の幅のほぼ中間の値にとっておけば、波形勾配が増すにつれて反射率は減少する傾向を示す。

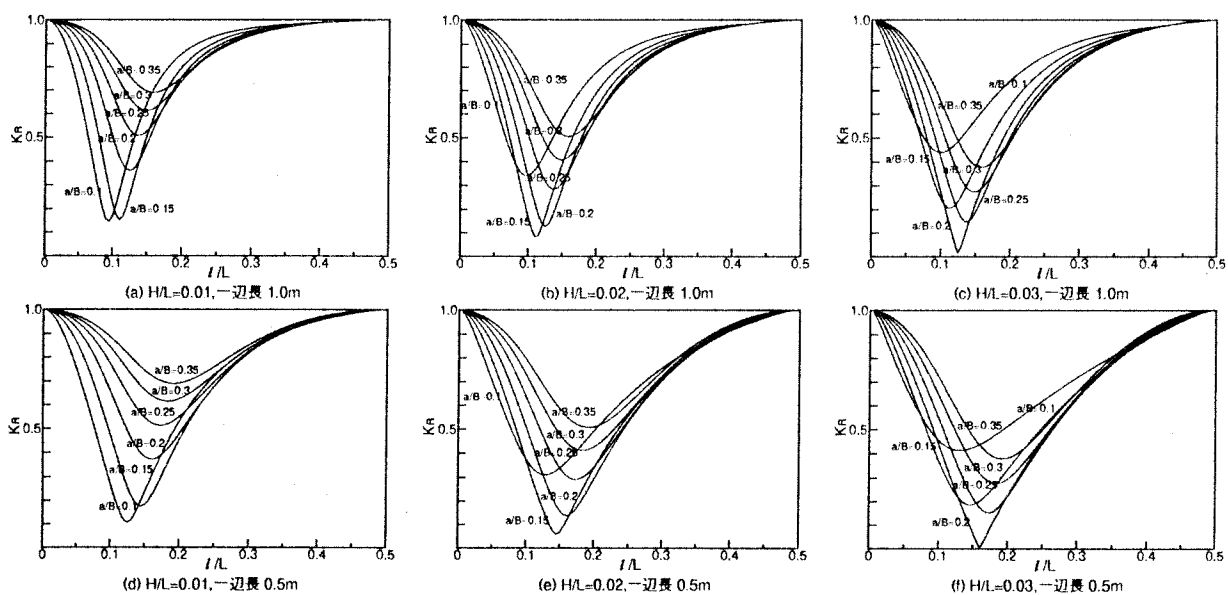


図-6 直立消波工の反射率（正方形断面角柱列）

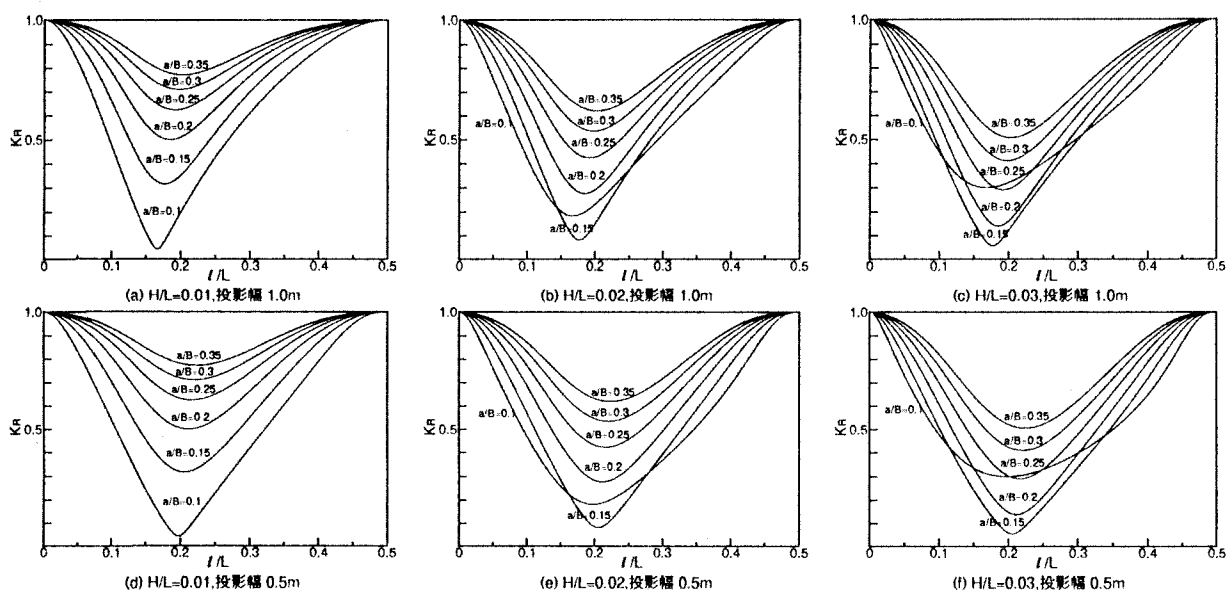


図-7 直立消波工の反射率（ひし形断面角柱列）

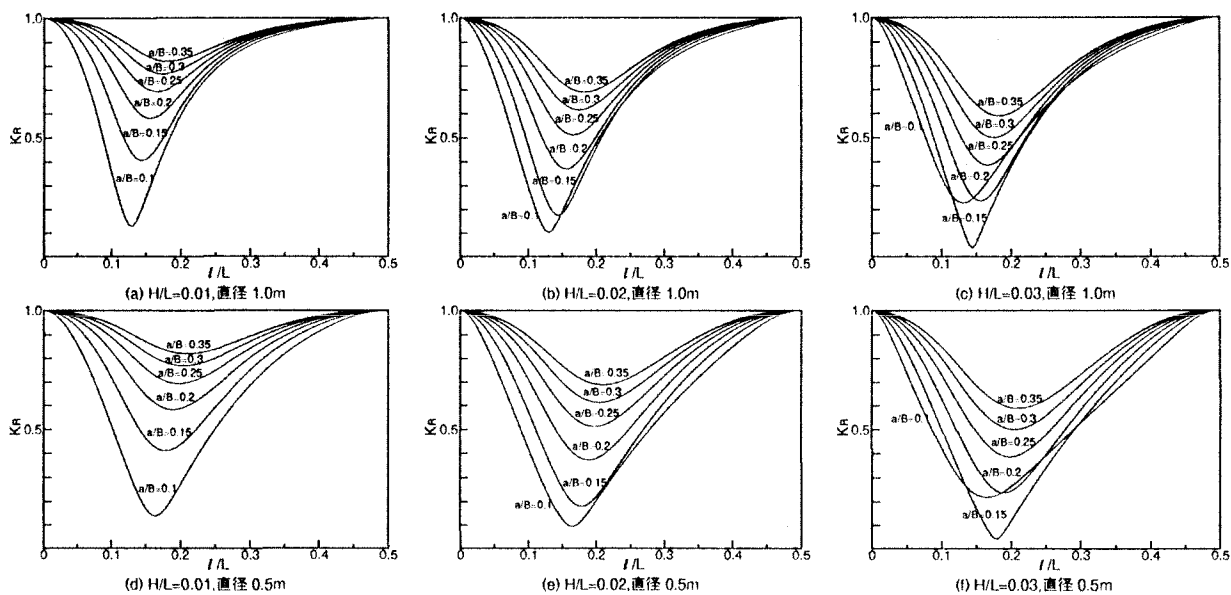


図-8 直立消波工の反射率（円柱列）

5. 3 工法や景観上の比較

各断面を工法的特徴の観点からみれば、まず角柱列は設計および施工が容易であることが挙げられる。これに対しひし形の場合には多少設計には工夫を要する点があることが予想されるものの、正方形と同じ一辺長のものを同じ開口率で設置する場合、単位法線長あたりの柱体本数がほぼ7割と少なくすむ利点が生まれる。また、円柱列では、コンクリートパイルや鋼管を使用することができ、任意の円柱径と開口率の達成が容易であろう。

景観的には、正方形ではその前面を覆う線が平坦で単調な感じを与え、いずれの方向からみてもスマートさに欠け、武骨であることはいなめない。これに対し、ひし形と円柱列では法線方向への陰影部の繰り返しがりズム感を生みだし、円柱列ではさらにその丸みがやわらかさを印象として与えるように思われる。

6. 結言

既発表の著者らの直立消波工の反射率を求めるための式を用いてひし形角柱列、円柱列を前面板にもつ直立消波工の反射率を理論的に求めた。式の算定に必要な2つの係数のうち、未知であったひし形角柱列の閉塞係数は境界積分法によって求め、また損失係数は既往の実験値より逆算した。理論値は実験値と比較することによりその妥当性を確認した。以上の手法より求められる反射率を正方形断面、正方形断面のひし形、円のそれぞれの柱体列をもつ消波工に対して求め、その特性を比較するとともに、工法や景観の観点からみた特徴についても検討をくわえた。

7. 参考文献

- 1) たとえば、角野昇八・小田一紀(1986): 任意断面柱体列による波の反射率および透過率の境界値問題解析、土木学会論文集、第369号/Ⅱ-5、pp.213-222.
- 2) Kakuno, S. and P. L.-F. Liu (1991): Scattering of Water Waves by Vertical Cylinders, submitted to the J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE.
- 3) Kakuno, S., K. Oda and P. L.-F. Liu (1992): Scattering of Water Waves by Vertical Cylinders with a Backwall, Proc. ICCE'92, Vol.23, (to appear).
- 4) 角野昇八・仲田義弘(1992): 菱形断面角柱列の波の透過率と反射率、平成4年度土木学会関西支部年講演概要、印刷中。
- 5) 角野昇八・小田一紀・阿部功(1984): 境界要素法による任意断面柱体列のBlockage Coef.の算定、昭和59年度土木学会関西支部年講演概要、pp.Ⅱ-97-1-Ⅱ-97-2.
- 6) 中村孝幸(1990): 柱体列まわりの渦流れと作用波力に関する研究、海岸工学論文集、第37巻、pp.664-668.
- 7) 角野昇八・小田一紀・重松孝昌・玉置博・芳田利春(1988): 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(第2部)、pp.660-661.
- 8) 榎木亨・岩田好一郎(1973): 多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する二、三の考察、土木学会論文報告集、第220号、pp.53-63.
- 9) Fugazza, M., and L. Natale(1992): Hydraulic Design of Perforated Breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE Vol.118, No.1, pp.1-14.