

消波ブロック被覆堤の反射率に及ぼすスケール効果

(財)電力中央研究所 正会員 榊山 勉

1. はじめに

消波ブロック被覆堤の反射率や遡上波ならびに消波ブロックの安定性に関しては古くから数多くの研究が行われてきた。それらのほとんどは室内実験によるもので、これらの成果を実際の現地に適用するに当たって実験スケール効果の問題が存在する。室内実験結果が構造物の設計を安全側に評価するものであれば問題は少ない。例えば、消波ブロックの安定性のスケール効果についてはThomsenら(1972)、島田ら(1986)や榊山・鹿島(1989)の研究によると、小スケールの実験では波力を過大評価し、そのまま現地に適用すると安全側の評価を与える。しかしながら、建設の経済性が追求される昨今では、安定性の合理的な評価方法が必要である。また、透過性構造物に関する実験スケール効果に関しては、Johnsonら(1966)、Shuto・Hashimoto(1970)、Delmonte(1972)、Wilson・Cross(1972)の研究があり、小スケールの実験が小さい透過率を与えることを報告している。このような実験スケール効果に関する問題の重要性は認識されているにも拘らず未だにその説明は充分ではない。本研究では、消波ブロック被覆堤の反射波特性を調べるために大型造波水路を用いて大スケールのもとで実験を行い、さらにフルードの相似則に従って行った実験結果よりスケール効果を示し、検討を加えるものである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は、長さ205m、幅3.4m、深さ6.0mの大型造波水路と長さ76.5m、幅0.9m、深さ1.2mの中型造波水路を用い、1/15勾配斜面上に防波堤模型を作製して行った。図-1に防波堤断面形状を示す。斜面勾配3/4で、消波ブロック被覆層は2層厚の乱積みである。被覆層の下部には消波ブロック重量の1/25～1/15の重さの中詰石でフィルター層を設け、堤体本体は1/400～1/100の重さの捨石で作製した。実験には3つのタイプの消波ブロックを採用し、各々のブロックについて4～5種類の大きさの模型をコンクリートで作製した。消波ブロックの諸元を表-1に示す。実験条件については榊山・斉藤(1988)に詳細に記されている。

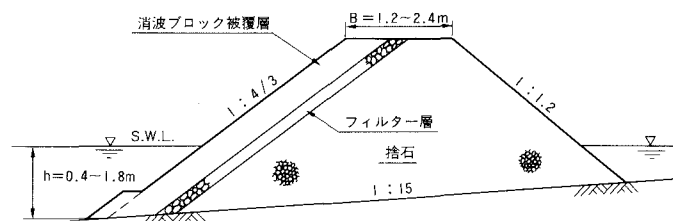


図-1 防波堤模型の断面形状

表-1 実験に用いた消波ブロックの諸元

ブロック	重量 W (kg)	高さ b (cm)	2層乱積状態		実験水路
			層厚 l (cm)	空隙率 e	
テトラポッド	2.2	15.1	20.1	0.50	大型造波水路
	6.8	22.0	29.3		
	20.9	32.0	42.7		
	49.3	42.6	56.8		
コーケンブロック	2.1	15.3	21.0	0.58	大型造波水路
	6.6	22.2	30.4		
	19.7	32.0	43.8		
	49.6	43.6	59.7		
ドロース	0.13	7.4	8.9	0.63	室内2次元造波水路
	0.28	9.1	10.9		大型造波水路
	2.0	18.0	21.6		
	9.7	30.0	36.0		
	29.4	45.0	54.0		

2.2 反射率の測定

反射率の測定は合田ら(1976)の入・反射波分離法によって行った。2次元造波水路において海岸構造物の反射率を測定する場合、十分に長い場合には入・反射波分離法をそのまま適用して反射率を求めることができる。しかし、水路内で多重反射系を生じる前に造波を停止する必要があるために、相対的に水路長が短い場合には、測定点で入射波と反射波の共存時間が短くなったり、入射波と反射波を同時に測定できない場合が多い。このために精度の高い反射率の測定が困難となる。そこで、造波開始から停止まで波の周期に等しい時間のデータ長1波1波について入・反射波分離法により入射波高、反射波高を求めた。こうすることにより図-2に示すように入射波一定、反射波一定の時間帯が確認できる。本実験では各々10波の平均値を求め、入射波高 H_I 、反射波高 H_R

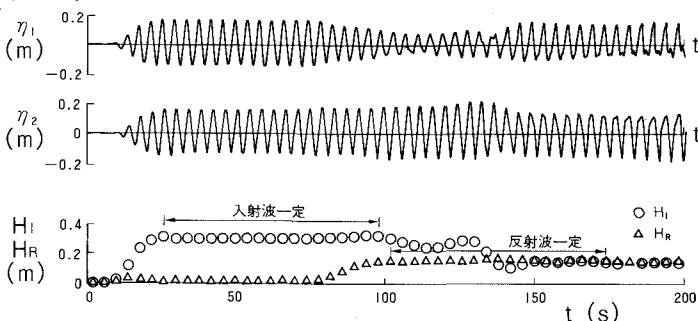


図-2 入・反射波分離法の応用

とし反射率 $K_R = H_R / H_I$ を算出した。この方法は安定した入射波と反射波を定めることができるので、水路長の短い場合に有効な方法である。

3. 実験結果と考察

3.1 反射特性

図-3は反射率 K_R と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を示したものである。この関係では相対水深 h/L がパラメーターとなる。ここに、図-3(a)から(c)にブロックの大きさの順に示してある。図中の λ は実験に用いた最大のブロックを基準にした縮尺である。沖波波形勾配が大きくなるにしたがって、反射率は減少する。また、反射率の値や $K_R - H_0/L_0$ 曲線の勾配は相対水深の関数になっており、 h/L が小さいほど反射率の値は大きく、変化も大きいことがわかる。同一の波浪条件のもとでは空隙率の違いによる反射率の顕著な差はみられない。被覆層の空隙率はブロックの安定性と波のエネルギー消滅の機能性とのバランスから適切な値が存在し、概ね本実験条件の範囲にある。したがって、2層乱積み被覆層の反射率に及ぼすブロックの形状もしくは空隙率の影響は他の物理量の影響に比べて非常に小さいものと考えられる。

以上のように定性的な傾向は模型スケールにより変わらないことが確認された。合田(1977)による異形消波ブロック斜面堤の反射率の概略値である0.3~0.5や藤本ら(1982)の実験結果である $K_R = 0.05 \sim 0.45$ や范ら(1983)の実験結果である0.2~0.5に比べて本実験結果は大きめの値を示している。このことは実験条件にも依存するものであるが、本実験では、沖波波形勾配が0.01以下での反射率が求められており、この領域で大きな反射率を示している。また、実験スケール効果の面からも全体的に大きめの値が示されている。

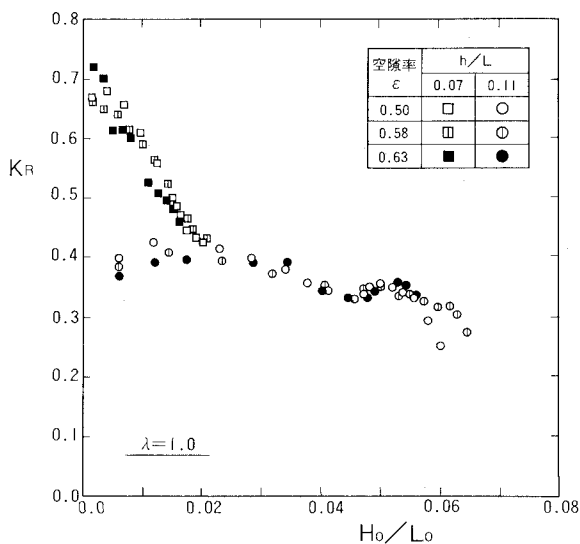
3.2 波のエネルギー消滅量と反射率の算定式

前節では反射率と波形勾配との間に相対水深をパラメーターにして明瞭な関係を示した。このことは、波のエネルギー消滅になんらかの抵抗則が存在することを示唆しているものと考えられる。そこで、反射率の算定式やスケール効果を説明するために波のエネルギー消滅について理論的な考察を加える。

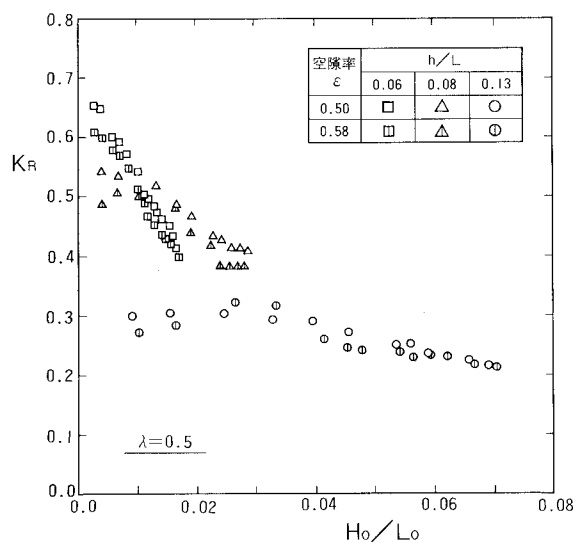
一周期の間での波のエネルギー消滅量 ΔE は次式で表される(Ippen, 1966)。

$$\Delta E = E C g T (1 - K_R^2) \quad (1)$$

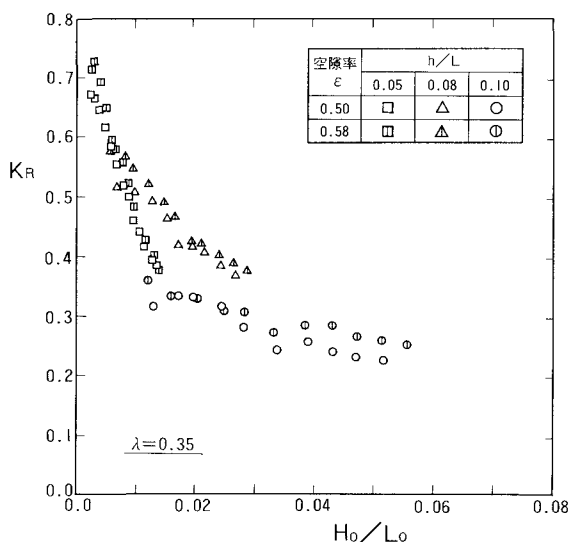
ここに、 $E = 1/8 \cdot \rho g H^2$ で波のエネルギー密度、 Cg は群速度、 T は周期である。消波ブロック被覆堤における波のエネルギー消滅量は、海底摩擦や内部粘性によるエネルギー損失に比べてはるかに大きい、遡上波のエネルギー消滅過程については明らかでない。そこで、図-4に示すように被覆層上の遡上波によるエネルギー損失を考える。被覆層を粗面とみなせば、これに作用するせん断応力が概念上考えられる。波の遡上時にこのせん断



(a) 縮尺 $\lambda = 1.0$



(b) 縮尺 $\lambda = 0.5$



(c) 縮尺 $\lambda = 0.35$

図-3 反射率の測定例

せん断応力が概念上考えられる。波の遡上時にこのせん断応力 τ のなす仕事は次式で表される。

$$E_r = \int_0^{\xi_r(t)} \int_{-\xi_b}^{\xi_r(t)} \tau u dt d\xi \quad (2)$$

ここに、 u ：流速、 ξ ：斜面方向に定義した座標系、 $\xi_r(t)$ ：遡上波のフロント位置、 $-\xi_b$ ：斜面法先の座標値である。

上式を厳密に求めるには現時点で数多くの課題が残されているため、ここでは以下のように簡略化したモデルを考える。せん断応力を $\tau = 1/2 \cdot \rho f u^2$ で表す。ここで、 f は2層被覆層の抵抗係数である。また、代表流速 u としては、実験式の確立という視点から、実用に供する微小振幅波理論で与え、断面法先における静水位での水平流速振幅の斜面方向成分をとることとする。

$$u_c = \frac{\pi H \cosh kh}{T \sinh kh} \cos \theta \quad (3)$$

ここに、 H ：波高、 h ：法先水深、 k ：波数、 θ ：防波堤斜面の勾配である。式(2)の算出のために時空間積分は代表長さとして時間積分範囲(周期)の積で置き換える。 $\xi_b = h / \sin \theta$ であるから、最終的にエネルギー損失 E_r は次式で表される。

$$E_r = \frac{1}{2} \rho f T \left(\frac{\pi H \cosh kh}{T \sinh kh} \cos \theta \right)^2 \frac{h}{\sin \theta} \quad (4)$$

いま、波の伝播中における砕波によるエネルギー損失がない場合を考える。消波ブロック被覆堤で消滅する波のエネルギーは式(1)の ΔE で与えられる。式(1)と式(4)から抵抗係数 f について解くと次式を得る。

$$f = \frac{n}{2\pi} \frac{1}{H} \frac{1}{h} \tanh^2 kh (1 - K_R^2) \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} \quad (5)$$

ここに、 n は群速度・波速比 $n = C_g / C$ である。

図-5は反射率の実測値と波浪条件を用いて上式から抵抗係数 f を求めたものである。横軸はJonsson(1963)の摩擦係数における水粒子軌道振幅 A と相当粗度 k_d との比のアナロジーから次式で表されるパラメータを用いている。

$$A / k_d = H / 2 \sin \theta / l \quad (6)$$

ここに、相当粗度 k_d としては最も簡明な量として2層被覆層厚さ l を用いた。図より抵抗係数 f と無次元粗度 A / k_d の間には両対数軸上ではほぼ直線の関係にあることが示された。さらに詳細にこの関係をみると相対水深 h / L がパラメータになっている。そこで、これらの関係を次式で表すことにした。

$$f = \alpha_1 \left(\frac{h}{L} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{A}{k_d} \right)^{\beta_1} \left(h / L \right)^{\beta_2} \quad (7)$$

ここに、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ は実験係数である。これらの実験係数は、実験スケールの影響の少ない大型造波水路における大型模型の実験結果を用いて定める。3種類の形状の異なる消波ブロックの実験結果より、被覆層の

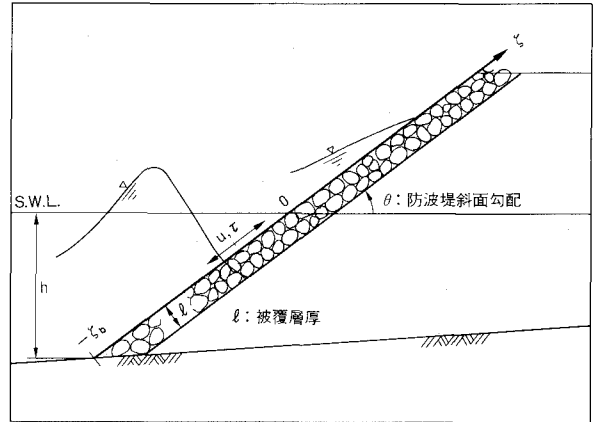


図-4 遡上波に関する定義図

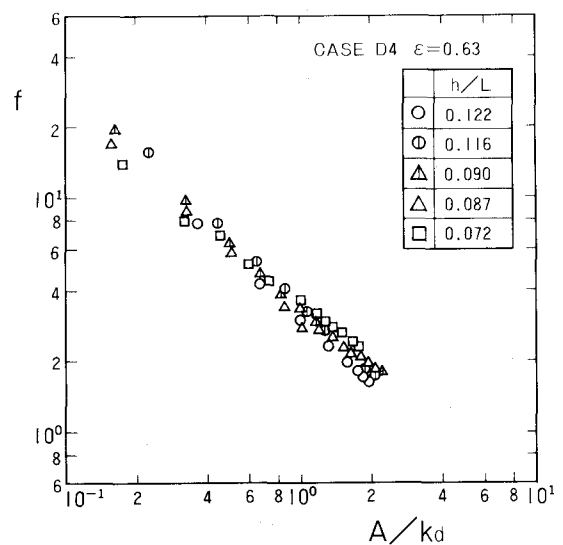


図-5 被覆層の抵抗係数

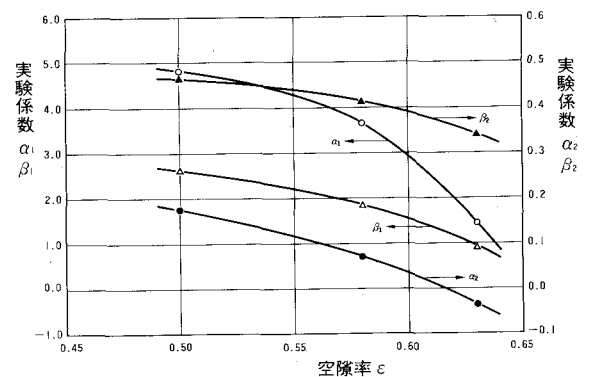


図-6 抵抗係数算定式の実験係数

空隙率に応じて図-6で与えられる。以上のような波のエネルギー消滅の簡単なモデル化と抵抗係数の算出から反射率に関する算定式が式(8)で表される。

$$K_R = \left\{ 1 - \frac{2\pi^2 f (H/L) (h/L) \cos^3 \theta}{\tanh^2 k h} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

図-7は実験結果と計算結果を比較したものであり当然のことながら両者は良く一致している。

3.3 反射率に及ぼすスケール効果

図-8はフルードの相似則にしたがって相対水深 h/L = 一定、相対ブロック高さ b/L = 一定のもで行った反射率の測定結果を示したものである。○印の高さ 0.07 m の実験結果を除き、全体的には実験スケールが小さくなるに従って反射率 K_R は小さくなる傾向が認められる。この傾向は室内実験による透過率のスケール効果の結果と一致している (Johnsonら(1966)、Delmonte(1972))。防波堤によるエネルギー消滅という観点から考えれば、反射率、透過率のスケール効果は基本的には波のエネルギー消滅に関する同一のメカニズムに起因するものと考えられる。従って、反射率、透過率に及ぼす実験スケールの影響は一致し、小スケールの実験ではこれらを過小評価することになる。

前節で定義した抵抗係数 f を用いて反射率のスケール効果について説明する。図-9は抵抗係数 f と次式で定義するレイノルズ数 Re_l との関係を示したものである。

$$Re_l = \frac{u_a l}{\nu} \quad , \quad u_a = \frac{\pi H \cosh k h}{T \sinh k h} \quad (9)$$

ここに、 u_a : 微小振幅波理論による断面法先における静水面での水平流速成分の振幅、 l : 2層被覆層厚、 ν : 動粘性係数である。この関係を次式で示す KC 数をパラメーターに整理した。

$$KC = \frac{u_a T}{l} \quad (10)$$

KC 数の分子は水粒子の運動距離に比例し、分母の l は斜面の粗度高さを代表する量と考えられる。したがって、 KC 数は相対的な粗度の逆数を表している。実験スケール効果を検討する場合にはこの相対的な粗度も一致させる必要がある。図中の記号は各実験スケールごとに KC 数の範囲別に示してある。また、実線は実測データの内外挿により KC 数 = 一定のもとの抵抗係数 f とレイノルズ数 Re_l との関係を示したものである。各実験スケールで、レイノルズ数 Re_l の増加にしたがい抵抗係数 f は減少する関係を示している。さらに、 KC 数 = 一定のもとの抵抗係数 f とレイノルズ数 Re_l の関係に着目すると、レイノルズ数 Re_l の増加にしたがい抵抗係数 f はわずかに減少する傾向を示している。即ち、相対粗度が一定のもとのスケールが大きくなるほど抵抗係数は減少する。このような図-9の全体的な傾向はJonsson(1963)の摩擦係数と同様の傾向を示している。

以上のように、反射率に及ぼす実験スケールの影響は、被覆層の抵抗係数とレイノルズ数、 KC 数との関係で表され、流れの抵抗則の概念と等価であると解釈できる。したがって、小スケールの実験では抵抗係数が大きく、

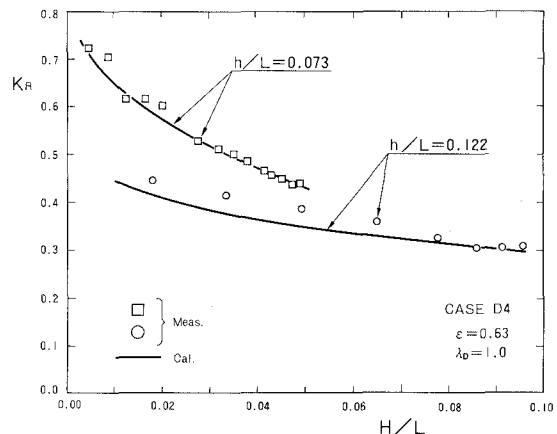


図-7 反射率の算定式と実験値との比較

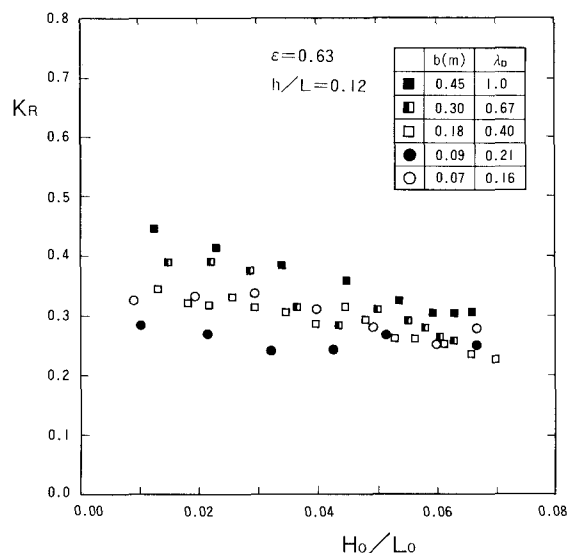


図-8 反射率に及ぼす実験スケール効果

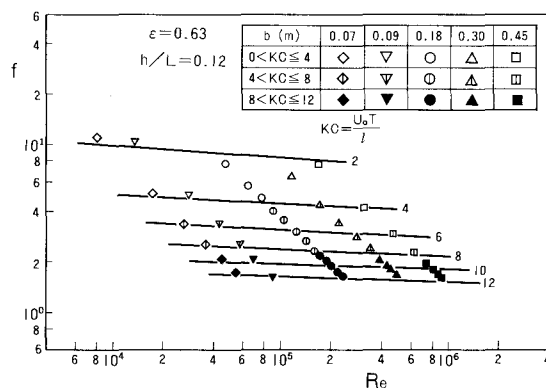


図-9 被覆層の抵抗係数とレイノルズ数との関係

相対的に波のエネルギー消滅量が大きくなる。その結果、反射率は過小評価されることになる。

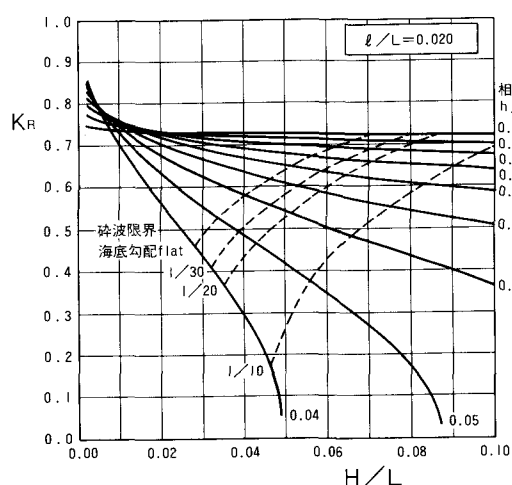
3.4 反射率の算定図

実験スケールの影響の少ない大型造波水路での大型模型の実験結果を用いて、式(7)より抵抗係数 f を定め、種々の波浪条件について反射率の算定図を作成し図-10に示した。同図は被覆層の空隙率が50%の場合の反射率の算定図であり、各図は被覆層厚・波長比をパラメータに表されている。図中の数字は法先での相対水深 h/L を表す。また、点線は式(11)で示される合田(1970)の砕波指標を用いて、水深 h での砕波限界を示したもので図の適用限界を意味する。

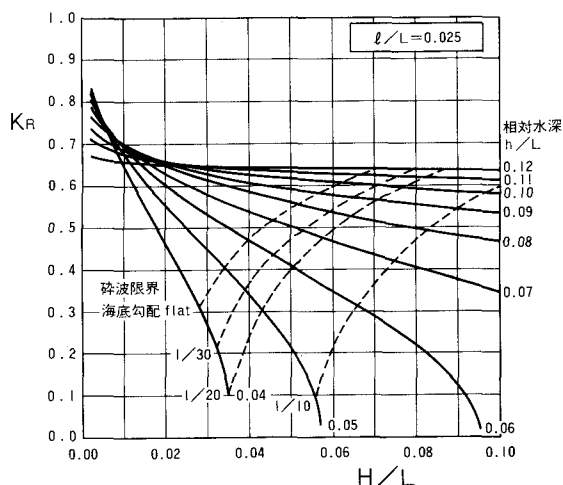
$$\frac{H_b}{L_0} = A \{ 1 - \exp [-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 1.5 \tan^{4/3} i)] \} \quad (11)$$

ここで、沖波波長 L_0 から水深 h での波長 L への換算は微小振幅波理論を用いた。

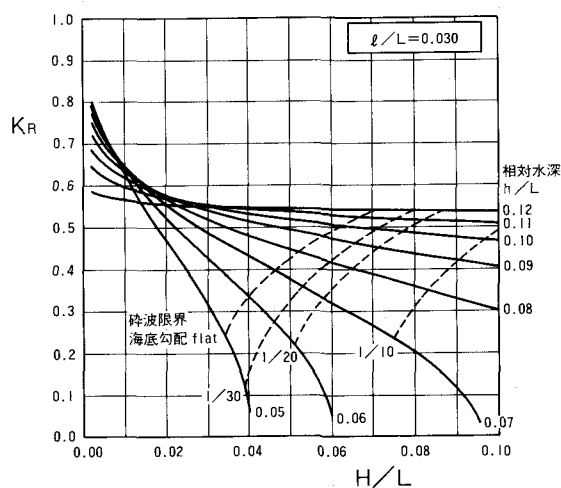
消波ブロック被覆堤の反射率については大まかな目安はあるものの各条件についてその都度水理実験により求めている場合が多いが、実用的な範囲については図-10の算定図、もしくは式(7)を用いて算定できる。



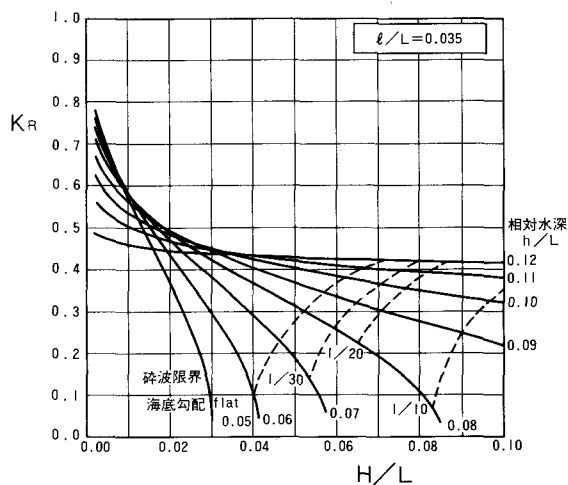
(a) 被覆層厚・波長比 $l/L = 0.020$



(b) 被覆層厚・波長比 $l/L = 0.025$



(c) 被覆層厚・波長比 $l/L = 0.030$



(d) 被覆層厚・波長比 $l/L = 0.035$

図-10 反射率の算定図

4. 結 論

本研究では、入射波、反射波のエネルギー収支と消波ブロック被覆層における波のエネルギー消滅のモデル化から消波ブロック被覆層の抵抗係数を定義した。この抵抗係数を用いて反射率に及ぼす実験スケール効果について解釈を加えた。また、反射率の算定式を誘導し、大型模型の結果を用いて反射率の算定図を作成した。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 2層被覆層の間隙率が50から63%の範囲では、形状の異なる種類のブロックによる反射率の顕著な差は認められなかった。
- 2) 反射率と波形勾配、相対水深との関係は定性的には小スケールと大スケールの実験結果は同様な傾向を示したが、定量的には一致せず、実験スケールによる影響が認められた。
- 3) フルードの相似則に従って実施した種々のスケールでの実験結果より、小スケールの実験は大スケールの実験より反射率を過小評価することが認められた。この現象を抵抗係数とレイノルズ数、KC数との関係で整理し、反射率に及ぼす実験スケール効果が流れの抵抗則の概念と等価であることを示した。

参考文献

- 合田良実(1970): 碎波指標の整理について、土木学会論文報告集、第180号、pp.39-49.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離法、港湾技術研究所資料、No.248, 24p.
- 合田良実(1977): 港湾構造物の耐波浪設計、鹿島出版会、237p.
- 榊山 勉・斉藤昭三(1988): 消波ブロック被覆堤の反射率と遡上波特性、電力中央研究所報告、研究報告、U88023、41p.
- 榊山 勉・鹿島遼一(1989): 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果、第36回海講論文集(投稿中)。
- 島田真行・藤本稔美・斉藤昭三・榊山 勉・平口博丸(1986): 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について、第33回海講論文集、pp.442-445.
- 范 期錦・渡辺 晃・堀川清司(1983): 不規則波に対する消波ブロック被覆堤の安定性に関する実験的研究、第30回海講論文集、pp.357-356.
- 藤本稔美・阿部宣行・長谷川寛(1982): 消波ブロックの水理特性に関する実験的研究、電力中央研究所報告、研究報告、382001、39p.
- Delmonte, R.C.(1972): Scale effects of wave transmission through permeable structure, Proc. 13th ICCE, Vol.3, pp.1867-1872.
- Ippen, A.T.(1966): Estuary and coastline hydrodynamics, McGraw-Hill, 744p.
- Jonsson, I.G.(1963): Measurements in the turbulent wave boundary layer, 10th Congress IHAR, London, pp.85-92.
- Johnson, J.W., H. Kondo and R. Wallihan(1966): Scale effect in wave action through porous structure, Proc. 10th ICCE, Vol.2, pp.1022-1024.
- Shuto, N. and H. Hashimoto(1970): Hydraulic resistance of artificial concrete blocks, Coastal Eng. Japan, Vol.13, pp.43-54.
- Thomsen, A.L., P.E. Wohnt and A.S. Harrison(1972): Riprap stability on earth embankment tested in large and small scale wave tanks, CERC Technical Memorandum, No.37.
- Wilson, K.W. and H.R. Cross(1972): Scale effects in rubble-mound breakwaters, Proc. 13th ICCE, Vol.3, pp.1873-1884.