

組立式消波工の反射率に関する研究

岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 学生会員 橋田 和博
 岡山大学大学院環境生命科学研究科 フェロー会員 前野 詩朗
 岡山大学大学院環境生命科学研究科 正会員 吉田 圭介
 建設情報研究所 正会員 中西 裕之
 ランデス(株) 野村 修治

1. はじめに

港湾や海岸では、来襲してくる波を制御するために、異形ブロックを用いた傾斜堤や被覆堤が普及していた。しかし港湾の利用価値の次第に高くなるとともに、限られた港内の水際線および水面をできるだけ有効利用する必要性が生じてきた。そこで、堤体幅が小さく、広く水域を利用できる直立性の消波構造物が普及することとなる。表-1 には、海岸・港湾構造物の構造様式ごとの反射率の概略値を示す¹⁾。波の透過を許さない直立壁は、天端が静水面上の場合、0.7~1.0 となり、また本研究で用いたような直立消波構造物は 0.3~0.8 となる。反射率の値に幅があるのは、構造や波の周期により、反射率が大きく変化するからである。本研究では、直立性消波構造物の中でも、製造や設置に要する費用および時間を節約するために開発された組立式の消波構造物の反射特性を知るために、模型実験によって反射率を求めた。実験では、波の周期および高さ、構造物の形状が反射率に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

実験は、全長 16m、高さ 1.6m、幅 0.6m の二次元造波水路(図-1)を用いて行い、長手方向に一定距離だけ離れた二つの容量式波高計によって水位変動を計測した。実験模型は、長さ 10cm、幅 4cm、高さ 2cm のブロック(図-2)と鋼管杭を組み合わせて積み上げたもので、不

透過の背面模型と透過性の前面模型を有する。また今回は模型を固定するために天板および床板を設けてある。

この消波構造物は、周期 4.5s~6.5s、波高 2~4m の波が作用する水深 25m の海域に設置することを想定したものである。模型縮尺は 1/25 で、フルードの相似則によって現地スケールとの換算を行った。

水深は 1.0m で一定であり、模型の構造条件は表-2 に示すような 4 ケースとした。なお、表-2 ではそれぞれの模型の平面図を示している。それぞれに対して表-3 に示すような周期 3 パターン、スライダー値 6 パターンの波を発生させて計 72 通りの実験を行った。なお波高計間隔は後述の条件に注意して選定した。またスライダー値とは、造波板の移動幅のことであり、これを調節することで入射波高を変化させることができる。例えば、周期が 1.3s、スライダー値が 8% のとき、入射波高はおよそ 5cm となる。これを現地スケールに換算

表-1 反射率の概略値

構造様式	反射率
直立堤(天端は静水面上)	0.7~1.0
直立堤(天端は静水面下)	0.5~0.7
捨石斜面(2~3 割勾配)	0.3~0.6
異形消波ブロック斜面	0.3~0.5
直立消波構造物	0.3~0.8
天然海浜	0.05~0.2

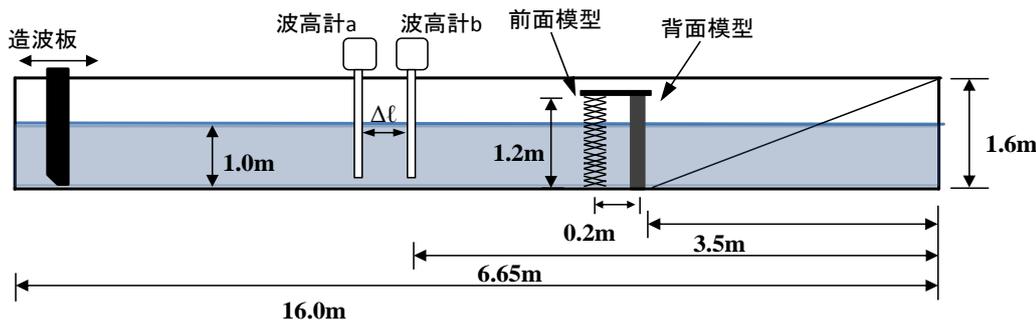


図-1 実験概要

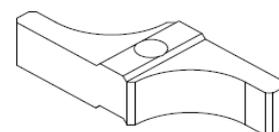


図-2 実験模型

すると、約 1.25m の波ということになる。また、想定する現地の波高 2~4m を実験波高に換算すると、8~16cm となる。波高計におけるデータのサンプリング周波数は 50Hz、データ個数は 4096 個とし、約 82 秒間計測した。

3. 反射率の算出方法

反射率の算出には、造波水路内の入・反射波の分離推定法を用いた²⁾。以下にその方法を簡単に示す。

水路内の距離 Δl だけ離れた 2 点、 $x=x_1$ および $x=x_2=x_1+\Delta l$ で波形が同時に記録されているとするものとする、この波形は一般に次のように表示することができる。

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \quad (1)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t$$

ここに、

$$\begin{aligned} A_1 &= a_I \cos \phi_I + a_R \cos \phi_R \\ B_1 &= a_I \sin \phi_I - a_R \sin \phi_R \end{aligned} \quad (2)$$

$$A_2 = a_I \cos(k\Delta l + \phi_I) + a_R \cos(k\Delta l + \phi_R)$$

$$B_2 = a_I \sin(k\Delta l + \phi_I) - a_R \sin(k\Delta l + \phi_R)$$

$$\begin{aligned} \phi_I &= kx_1 + \varepsilon_I \\ \phi_R &= kx_1 + \varepsilon_R \end{aligned} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_I, \eta_R : \text{入・反射波による水面変動量} \\ a_I, a_R : \text{入・反射波の振幅} \\ \varepsilon_I, \varepsilon_R : \text{入・反射波の位相角} \\ k : \text{波数} = 2\pi/L (L \text{は波長}) \\ \sigma : \text{角周波数} = 2\pi/T (T \text{は周期}) \end{array} \right.$$

これらの式のうち、式(3)は四つの未知数 a_I, a_R, ϕ_I, ϕ_R に対する四つの方程式群である。今、 A_2, B_2 の表式から a_R, ϕ_R を消去すると、

$$A_2 = (A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l) - 2a_I \sin k\Delta l \sin \phi_I \quad (4)$$

$$B_2 = (-A_1 \sin k\Delta l + B_1 \cos k\Delta l) + 2a_I \sin k\Delta l \cos \phi_I$$

となるので、これから ϕ_I を消去すれば a_I が求められ、同様の演算を行えば a_R が求められる。

$$a_I = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2 \right]^{1/2}$$

すなわち、 $A_1 \sim B_2$ の振幅および 2 点間の位相角 $k\Delta l$ か

表-2 実験条件(模型の構造条件)

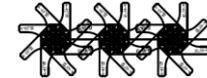
背面模型	前面模型	開口率 (%)
		0
		12.5
		30
	なし	—

表-3 実験条件(波浪条件)

周期T(s)	波高計間隔 Δl (cm)	スライダー値(%)	
1.3	60	8	
	70		
	80		
1.1	50		10
	60		12
	70		15
0.9	40		18
	50		20
	80		

ら入・反射波の振幅 a_I, a_R が求められるわけである。なお、この計算においては水深 h 、周期 T に対する波長 L をまず求め、位相角 $k\Delta l$ を計算する必要がある。この波長は、微小振幅波理論に基づく分散関係式から求めた。

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (6)$$

実際の波形記録にこの方法を適用する場合、波形は式(1)のような基本周期だけではなく、2倍、3倍、その他の m 倍周波数成分を含んでいる。したがって、2測点のそれぞれの波形について高速フーリエ変換を行い、基本周期の余弦および正弦成分の振幅 A_1, B_1 および A_2, B_2 を求め、その上で式(5)によって a_I, a_R を求めればよい。反射率は、反射波振幅 a_R の入射波振幅 a_I に対する比として求められる。

しかし、式(5)より $k\Delta l = n\pi (n=0,1,2,\dots)$ の時、つまり $\Delta x = nL/2$ のときは分母が 0 となり、 a_I と a_R は発散するので、波高計の設置間隔 Δx は $\Delta x = nL/2$ 近傍にならないよう注意しなければならない。今回の波の周期は 0.9s, 1.1s, 1.3s であり、その波長は式(6)を用いてそれぞれ約 126cm, 約 180cm, 約 260cm となる。

4. 実験結果

まず背面模型のみに波を作用させてその反射率を求めた。その結果を図-3に示す。なおスライダー値が15%のときに、跳ね返った波が天板に当たっていたためそれより大きなスライダー値での実験を取りやめた。図より、15%のときに反射率が小さくなっているのは、天板に当たっていた影響であると考えられる。なお周期が0.9sの場合に、全てのケースで反射率の計算結果が小さくなっているのは、水路内に発生していた碎波による影響であると考えられる。よって背面模型のみの反射率は0.8程度であると言える。直立壁の反射率の概略値である0.7~1.0の範囲内にあるのでこの結果は妥当であると言える。

次に前面模型も取り付けられた状態で実験を行った。図-4は入射波の推定波高と反射率の関係を開口率の違いで分類したものである。入射波の波高は、式(5)から求

められた入射波の推定振幅の2倍の値とした。図より、前面模型の開口率に関わらず、入射波高の増大とともに反射率が小さくなる傾向が見られる。同様に、周期が小さくなると反射率も小さくなる傾向があるように見えるが、周期0.9sのときに発生していた碎波の影響により明確な相関があるとは言えなくなっている。これらの傾向は、重松ら(2011)の研究結果³⁾と同様のものである。

図-5は、入射波の推定波高と反射率の関係を波の周期で分類したものである。図より、周期が1.3sおよび1.1sの場合には、前面模型の開口率が大きくなるとともに反射率も大きくなっていることが分かる。この傾向は、島田ら(1995)の研究結果⁴⁾と同様のものである。入射波高が大きくなるとその傾向が現われなくなるのは、波が天板に当たっているためであると考えられる。周期が0.9sの場合には、開口率の違いによる明確な相関が見られなくなっている。これは周期が0.9sの実験時に、

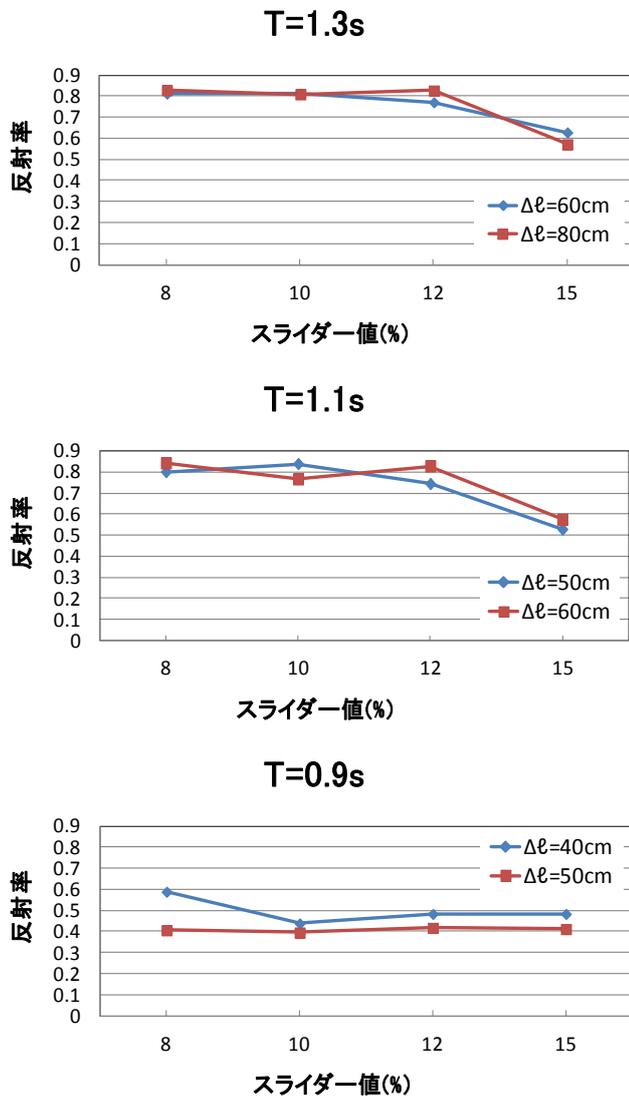


図-3 スライダー値と反射率の関係

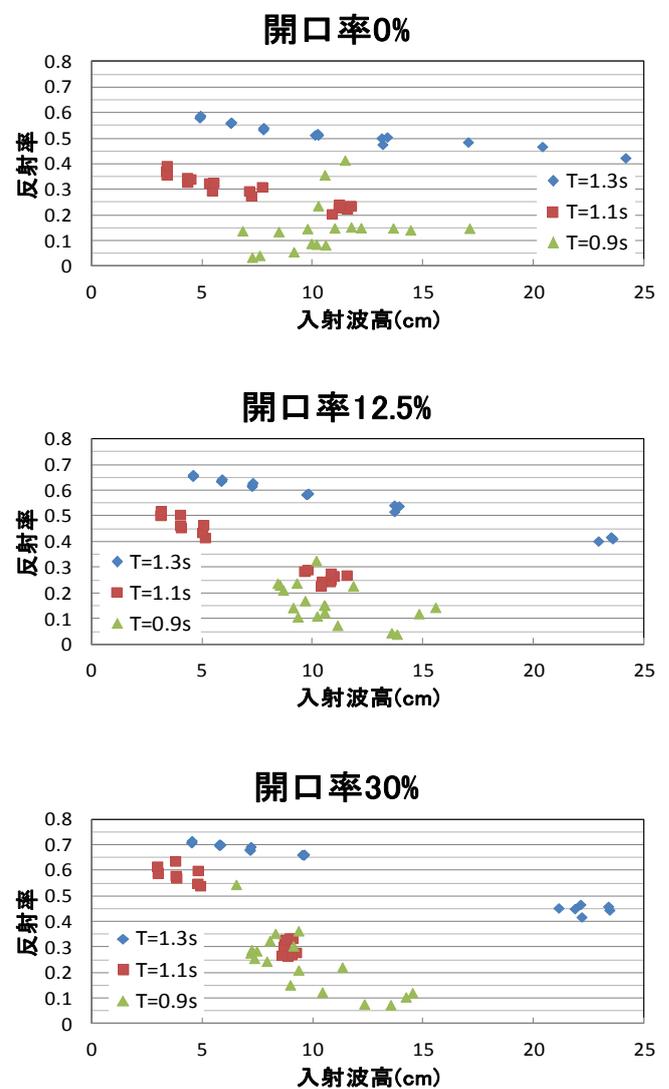


図-4 入射波高と反射率の関係

水路内に砕波が発生していたことが原因であると考えられる。

5. 結論

本研究は、製造および設置に要する費用や時間を削減するために開発された直立性消波構造物の反射率を、模型実験によって明らかにすることを目的としている。

実験は 1/25 のスケールで行い、波の周期、波高、模型の開口率といった条件の違いが反射率に及ぼす影響について検討した。その結果をまとめると次の通りとなる。

- ・背面模型のみの構造物の反射率は、0.8 程度である。
- ・消波構造物の反射率に影響を及ぼす要素は、波高、波の周期、前面模型の開口率の 3 つがある。
- ・波の周期が短くなると、または波高が大きくなると、反射率は小さくなる傾向が見られる。
- ・前面模型の開口率を下げると、反射率は小さくなる。
- ・周期が 0.9s の波を発生させたときの結果は、水路内に砕波が発生していたため、構造物そのものの反射率を示しているとは言えない。

以上の結果から、従来の消波構造物と比較して低コストかつ短い工期で、反射率を同程度低減することが可能で、また最も反射率の低減が期待できるのは開口率 0% の構造であることが得られた。

今後の課題は、今回の実験では模型によって跳ね返った波が天板にぶつかることがあったため、結果にばらつきが見られた。水面と模型の天端高さの差をより大きくする必要がある。

参考文献

- 1) 合田良実：耐波工学，2008
- 2) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊地治：不規則波における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料 No.248，1976.12
- 3) 重松孝昌，竹下航，前川雅俊，坪井研，松下紘資，徳永誠之：被覆直立堤の反射特性に及ぼす被覆断面の影響に関する実験的研究：土木学会論文集 B3，Vol.67，No.2，2011
- 4) 島田潤一，塩田啓介，今塩宏之：杭式スリット消波構造物の反射率に関する模型実験，海洋開発論文集 Vol.11，1995.6

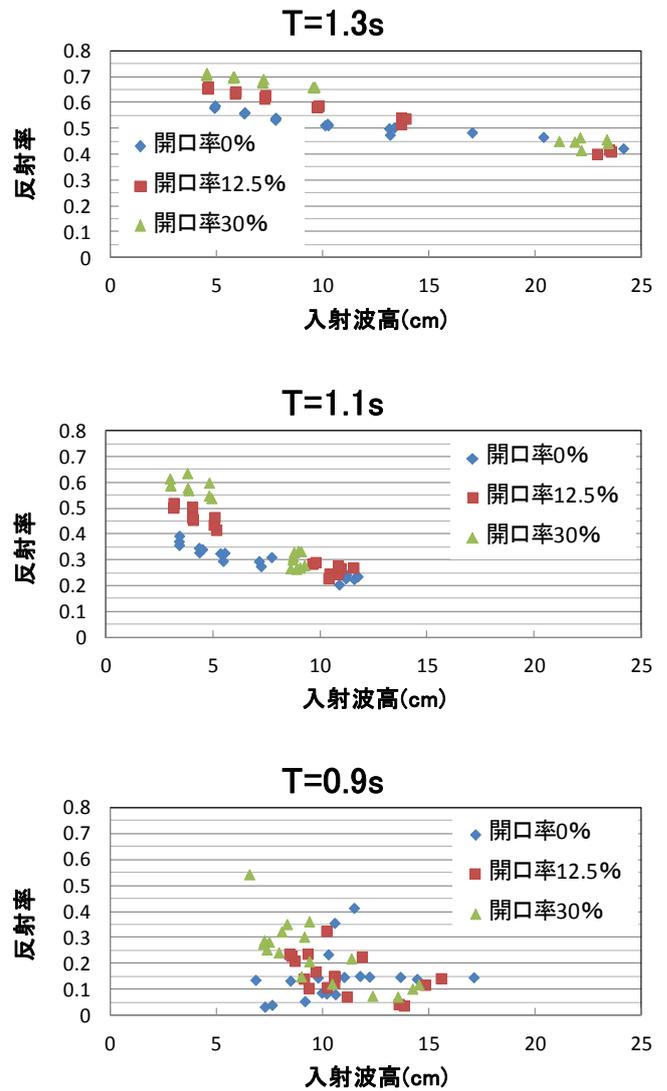


図-5 開口率による反射率変化