

複合断面捨石堤の低反射効果について

榎 木 亨*・柳 青 魯**・楠 見 正 人***

1. ま え が き

近年、防波堤建設に伴う周辺海域の擾乱、特に反射波による航行船舶への影響、あるいは周辺海岸の地形変化に対する影響が問題となり、低反射ケーソン防波堤の建設がとり入れられて来ている。一方、従来の捨石防波堤の安定に対する研究についても、ポルトガルのシネス港災害以後再検討が加えられ、その安定断面として複合断面が適した断面であるという指摘がなされている。

このような複合断面設計の考え方は、捨石堤が破壊した後の平衡断面が複合断面となることに基づくものであり、Bruun¹⁾、榎木²⁾、著者ら^{3),4)}等多くの研究者によって指摘されてきているが、ほとんどの研究が定性的で限られた条件での平衡断面形状の論議にとどまっている。このうち榎木²⁾は防波堤法先での洗堀による消波工の安定条件を提示している。また著者らは他の研究成果において防波堤の平衡断面の形状を規則波³⁾、不規則波⁴⁾に対して論議し、その特性を応用する捨石堤の複合断面設計に関する定量的設計指針を与えている。

本研究はこのような安定断面を示す捨石堤の複合断面が、いかなる波浪制御機能を有しているかについて検討し、低反射機能をもたすためには、いかなる複合断面形状をとるべきかを明らかにしようとしたものである。

2. 水理模型実験と解析方法

実験は長さ 30 m、幅 0.7 m、高さ 0.95 m の片面ガラス張りの 2 次元造波水路を用いた。防波堤模型は従来の一様断面捨石堤に加えて複合断面を有する構造形式をもとり入れて、その斜面上の流れ特性（反射波、Run-up、Run-down）に対する水理実験を行う。

一様断面および複合断面構造の構造物諸元、規則波と不規則波に対する実験条件が表-1 に示されている。同表における複合断面構造物の諸元は著者らの規則波および不規則波に対する平衡断面の形状特性に対する調査結果をモデル化したものであり^{3),4)}、おもに平坦部の長さ

(l_B) とその上部水深 (h_1) を変化させたものである。一方、複合断面の平坦部の勾配 (θ_2) とその上部勾配 (θ_3) および下部勾配 (θ_1) は一定とした。(記号は 図-1 参照) また、構造物は被覆層と Filter 層と Core 部で構成された透過性を有するものである。不規則波に対しては規則波実験結果から最適断面と判断された断面諸元(表中の * 印) についてのみ実験を行った。

不規則波の入力信号は木村のインパルス応答関数法⁵⁾によりシミュレーションを行った。すなわち、一般の不規則波のスペクトル型はピーク周波数 f_p を用いて次式のように表わすことができる。

$$S(f) = S(f_p) \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-m} \exp \left[\frac{m}{n} \{ 1 - \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-n} \} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここに $S(f)$ はパワースペクトル、 m 、 n は定数であり、 $m=5$ 、 $n=4$ であるケースは Pierson-Moskowitz Spectrum になり、 $m=6$ 、 $n=2$ のケースは Neuman Spectrum になる。表-1 に示したような期待 Spectrum になるような応答関数を求めて入力信号を作り、それを用いて造波せしめた。造波した波の Spectrum 型、波高、周期の分布特性および群波特性までを検証して、一般の現地波の性質と一致することを確認してから本実験を行った。

このような条件下で防波堤前方の距離 x による水面変動、反射率、そ上波を測定した。規則波による反射波および防波堤前方の水面変動を測定するために、20 cm 間隔に容量式波高計を 5 本一組にならべて設置し、2 cm ずつ動かして約 2 波長分程度の距離に対する水面変動を測定し、反射率は Healy の方法で求めた。なお、不規則波に対する反射率測定は、堤前方一波长以上離れた地点に 20 cm 間隔で設置された 2 本の容量式波高計から水面変動の時系列を data recorder に収録し、合田の 2 点測定法⁶⁾により求めた。一方、斜面上のそ上波特性は容量式波高計を斜面上にそって張ったそ上計により測定し、それを波別解析した。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 釜山水産大学助教授 海洋工学科

*** 正会員 工修 (株)鴻池組 第2技術部

表-1 構造物諸元および実験条件

General condition	Uniform slope (θ)	Modified property of composite slope						Wave condition						
		h_1 (cm)	l_B (cm)	θ_1	θ_2	θ_3	θ'	Regular wave		Irregular wave				
										Case	f_p	$S(f_p)$	m	n
W_a : 20g	1 : 1.5	5	15	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.0	T	0.8sec	W.1	1.0	5.0	5	4
l_a : 1.96cm		5*	25*	1 : 1.5*	0*	1 : 1.5*	1 : 2.3*			W.2	0.9	5.0	5	4
l_f : 1.0-1.5cm		5	30	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.5			W.3	0.6	5.0	5	4
l_c : 0.5cm	1 : 20	5	35	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.7	H	3.0cm	W.4	1.0	5.0	6	2
		10	15	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.0			W.5	0.8	5.0	6	2
r_a/l_a : 2.0	1 : 30	10	25	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.3			W.6	0.6	5.0	6	2
		10	30	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.5							
h_0 : 20cm		10	35	1 : 1.5	0	1 : 1.5	1 : 2.7							

注) W_a : 被覆材の重量, l_a : 被覆材の代表径, l_f : filter 層材の代表径, l_c : core 被覆層厚, r_a : 法先水深, h_0 : 不規則波実験, *: の場合の構造諸元

3. 規則波に対する複合断面の低反射効果

3.1 反射波に対する断面形状の影響

表-1 の実験条件に示したような断面諸元の変化による反射波特性の変化, および断面の複合化による反射波の特性を一樣断面の場合と比較検討する。図-1 は複合断面平坦部の水深, $h_1=5\text{cm}$ および $h_1=10\text{cm}$ の場合における反射率 K_r と波形勾配 (H/L_0) の関係を示したものであり, 比較のため一樣断面の場合の値も示してある。同図から h_1 と l_B の諸元によって反射率の変動が著しいことが見うけられ, 必ずしも l_B が長いからといって低反射にはなっていない。すなわち, 反射波の低減効果を考慮する場合には h_1 および l_B の最適値の関する論議が必要となろう。

まず, 平坦部水深が 5cm の場合 10cm との場合の反射率の変化をみると, 全体的に 5cm の場合が 1/2 以上も小さくなっている。また, $h_1=5\text{cm}$ の場合における l_B の変化による K_r の変動は波形勾配 (H/L_0) にかかわらず, $l_B=25\text{cm}$ の時に最小値を示し, l_B がそれより長くなっても短くなっても, 反射率が大きくなっていることがわかる。

次にこれら複合断面の反射波特性と一樣断面の反射特性を比較検討してみよう。 $h_1=10\text{cm}$ の場合の K_r は一樣断面の K_r よりやや小さめの値を示すが, 反射波低減

の効果はさほど大きくはない。しかし, $h_1=5\text{cm}$ のケースでは反射率が一樣断面に比べて 1/10~1/2 程度となり, h_1 および l_B を最適値にすることより反射波低減の面で非常に有効な工法として取り扱えることがわかる。

このような反射波低減の原因として次のようなことが考えられる。1) 複合断面平坦部での砕波および斜面粗度による energy 逸散が一樣断面に比べて大きくなる。2) 反射波源が図中の断面模式図における θ_1 の斜面上と θ_3 の斜面上の 2 つにわかれ, 低反射護岸と同様その位相差が堤前方の水面変動量に影響を与える。上述 1) の原因による反射波低減効果については定量的評価が難しいし, 砕波領域の波は一般的に反射率が小さく, かつ断面形状による K_r の差がそれほど大きくないと判断し, ここではまず 2) の原因について検討して見る。 l_B の長さ と入射波特性による反射波特性を調べるため, H/h_0 , H/L_0 を parameter にとりて K_r と l_B の関係を調べたのが 図-2 である。同図からわかるように波形勾配が小さいほど反射率は大きく現れることは従来的一样断面と同じであるが, いずれの波形勾配に対しても $l_B/L_0 \approx 0.2$ で K_r が極小値を示す。これは低反射岸壁の遊水部の消波効果と全く同様の消波特性である。

3.1 理論的考察

上述のような反射波の位相干渉効果による反射波低減機構を明らかにするため, 複合断面を有する捨石防波堤

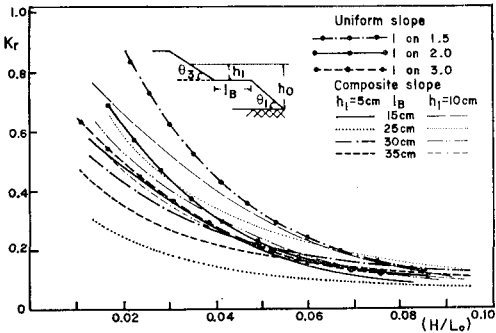


図-1 反射波の変動特性

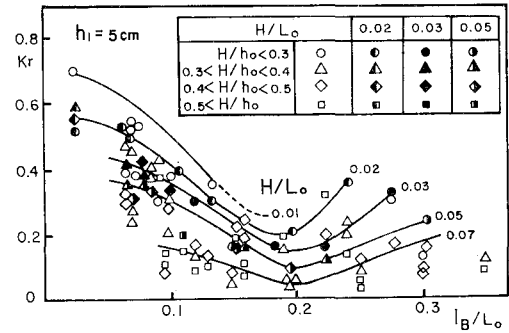


図-2 複合断面平坦部の長さ と 反射率

前方の水面変動に関する位相論からの理論値と実験値を比較してみる。図-3 は複合断面を有する捨石防波堤斜面上の波の位相干渉に関する模式図である。ここで本質的には平坦部にて無限に繰り返し反射すると考えられるが、本研究では図中の ①, ②, ③ の波成分に対する位相干渉効果のみをもって論議する。一般に図中の ①, ②, ③ で示された入射波と反射波に対する時空間水面変動は次式のように表現できる。

$$\eta_{\text{①}}(x, t) = H/2 \cdot \cos(\sigma t - kx) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_{\text{②}}(x, t) = H/2 \cdot K_{r1} \cos(\sigma t + kx + \theta_{R1}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_{\text{③}}(x, t) = H/2 \cdot K_{r1}^2 K_{r2} \lambda^2 \cos(\sigma t + kx + 4\pi l_B/L + 2\theta_{T1} + \theta_{R2}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\eta_{\text{②}}(x, t)$, ($i=①, ②, ③$) はそれぞれの成分波に対する時空間の水面変動、 H は入射波高、 K_{r1} K_{r1} はそれぞれ境界 1 での反射率および透過率であり、 K_{r2} は境界 2 での反射率、 λ は平坦部での energy 減衰率、 L は入射波の波長、 θ_{R1} , θ_{T1} はそれぞれ境界 1 での反射波透過波成分の位相差、 θ_{R2} は境界 2 での反射波の位相差、 σ は角周波数 ($2\pi/T$)、 k は波数 ($2\pi/L$) である。

式 (2), (3), (4) の和をとり、簡単な計算により入射波で無次元化した時空間水面変動分布は次式のようにになる。

$$\frac{2\eta_0}{H}(x, t) = \alpha \cos \sigma t - \beta \sin \sigma t \\ = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cos(\sigma t + \theta^*) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに

$$\alpha = \cos kx + K_{r1} \cos(kx + \theta_{R1}) + K_{r1}^2 K_{r2} \lambda^2 \cdot \cos(kx + 4\pi l_B/L + 2\theta_{T1} + \theta_{R2}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\beta = \sin kx + K_{r1} \sin(kx + \theta_{R1}) + K_{r1}^2 K_{r2} \lambda^2 \cdot \sin(kx + 4\pi l_B/L + 2\theta_{T1} + \theta_{R2}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta^* = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (8)$$

上記の式 (5) により距離 x における水面変動量が求められる。ここで実際の計算において任意の断面形状に対して与えるべき係数は K_{r1} , K_{r2} , K_{T1} , λ , θ_{R1} , θ_{R2} , θ_{T1} である。しかし、これらの係数いずれも理論的に正確な値を求めるのは困難であるので、本研究では大胆な仮定ではあるが、まず K_{r1} , K_{r2} , K_{T1} 以外の項を無視できるものとして、図-3 の ①, ②, ③ の波成分のみに対して考慮して波の位相干渉効果を論じていく。一方、 K_{r1} , K_{T1} に対しては半無限の天端幅をもった深さ 5cm の潜堤による反射率および透過率の実験値を与え、 K_{r2} に対しては一様断面での反射波実験結果を代入して計算を進めた。

図-4 (a), (b) は防波堤前方の水面変動に関する実験値と理論値を同時に示した一例であり、図中 $H_{c\max} = 2\eta_{c\max}$ である。なお実験条件と計算上与えた係数は図

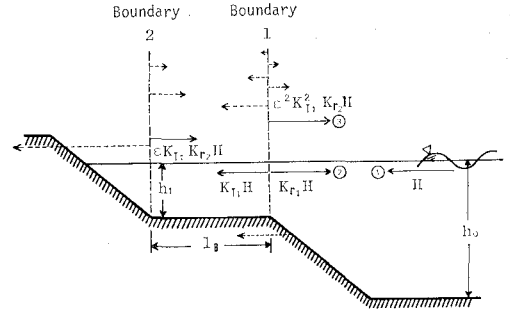


図-3 複合断面上の波成分の位相干渉

中に記されている。上述のような大胆な仮定にもかかわらず、堤前方の水面変動の理論値は比較的良好に一致している。ただ、図-4 (b) のように実験値と理論値のずれを生じることがある。これは無視した位相差の効果と考えられる。この結果より、入・反射波の位相干渉効果は低反射護岸の場合と同様に取り扱ってよいと結論づけられよう。

以上のことから、反射波制御の面から複合断面の諸元を考える場合、図-3 の中の波成分 ② と ③ の振幅が同一で位相が 180° ずれるような構造形式を考えればよいことになる。複合断面捨石防波堤の場合、低反射岸壁のように空隙率等による K_{r1} , K_{T1} の調節が不可能であるから、境界 1 での反射率の調整のためには平坦部の深さを調節せざるを得ない。また、位相干渉効果を最大限に果たさせるための長さを最適に決めるべきであろう。

本研究の実験結果からみれば、 $H/2 < h_1 < H$ の条件を満たしかつ $l_B/L_0 \approx 0.2$ において位相干渉による反射波の制御効果がよいことになるが、これは簡単な数値計算によっても算定できよう。

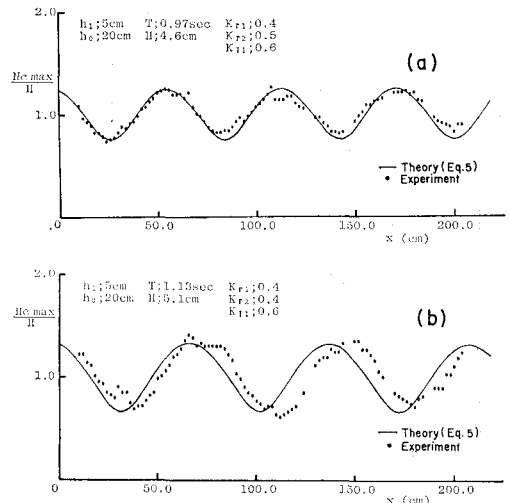


図-4 防波堤前方の水面変動

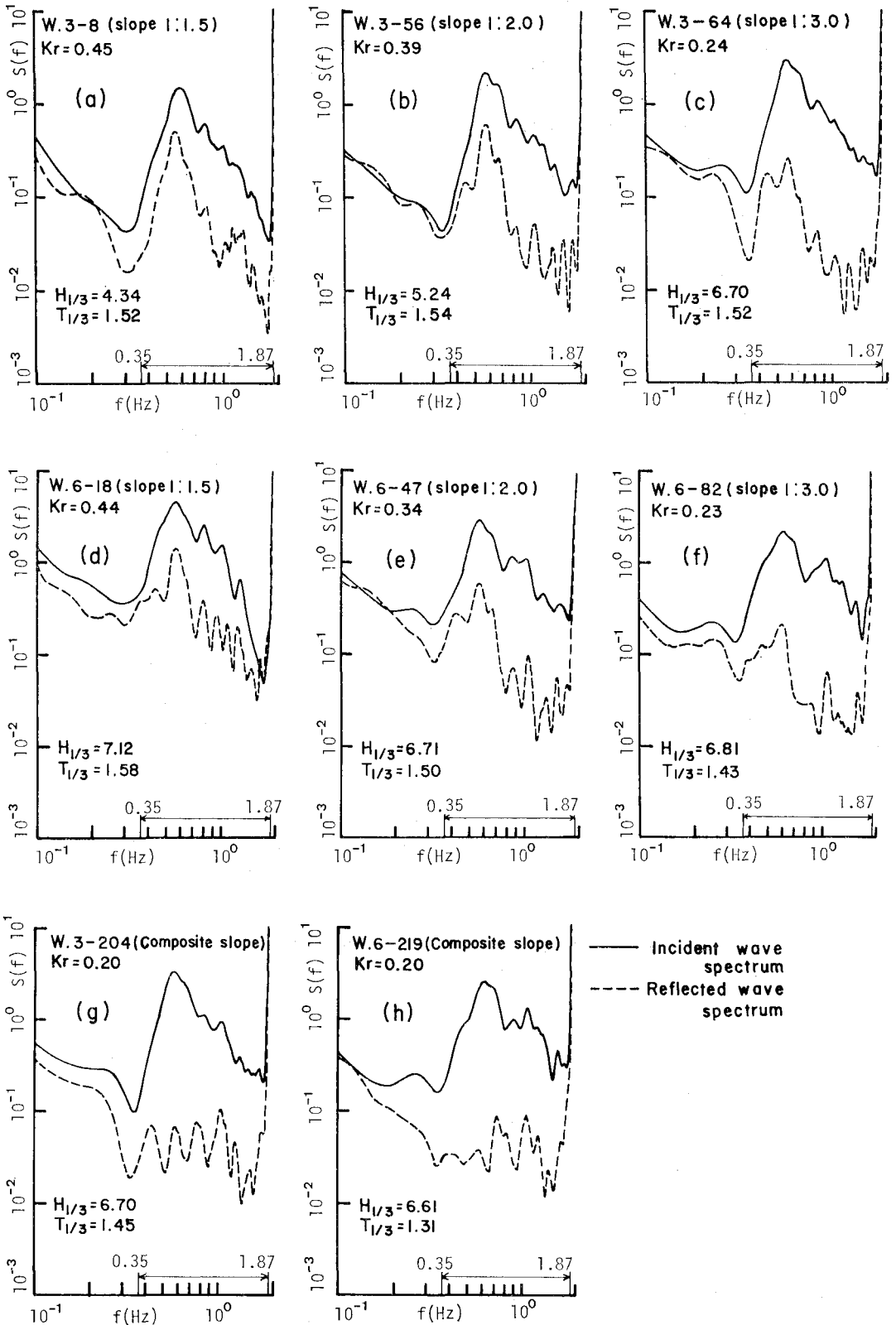


図-5 断面変化による不規則波の反射波特性

4. 不規則波に対する複合断面の低反射効果

4.1 複合断面上の不規則波の反射波特性

図-5 (a)~(h) は合田の2点測定法により分離した入・反射波の Spectrum を示した一例である。同図は表-1 に示した不規則波の実験ケースのうち Peak 周期の最も長いケースである W.3, W.6 に対して有義波高がほぼ同一の場合を取り挙げて勾配別に示したものである。同図の (a)~(f) は一様断面における反射波特性を示したものであり, (g), (h) は複合断面の場合に対して示したものである。同図において, 一様断面の場合は波の種類 W.3, W.6 のいずれも斜面勾配により変化し, 勾配の緩いほど反射率が小さくなるという当然の結果が見出される。一方, 複合断面での結果と一様断面での傾向を比較してみると, 複合断面の仮想勾配 (θ') は 1:2.3 であるが, 一様勾配の 1:3 での反射率よりもはるかに小さいことが明らかに認められる。

また, 同図における Spectrum 型に注目すれば, 一様断面の場合には Peak 周波数付近の周波数帯の成分波が反射波においても卓越しているのに対し, 複合断面時においては反射波の Spectrum 型に卓越した周波数帯が見うけられない変動を示している。これは断面の複合化によって不規則波の成分波ごとに反射波が変動していくためと考えるとよからう。

4.2 複合断面上の不規則波のそ上波特性

不規則波による Run-up, Run-down の性質について示したのが図-6 である。同図では Run-up, Run-down の代表値として $R_{u1/3}$, $R_{d1/3}$ をとって整理したもので, $R_{u1/3}$ ($R_{d1/3}$) と $\xi_{1/3}$ の関係で示している。ここで $\xi_{1/3}$ は有義波に対する Surf Similarity Parameter ($\xi_{1/3} = \tan \theta / \sqrt{H_{1/3}/L_{01/3}}$) で複合断面の場合には斜面勾配 (θ) に対して仮想勾配 (θ') を用いて計算した $\xi_{1/3}$ である。同図から, 不規則波の場合においても Run-up, Run-down は $\xi_{1/3}$ によって変化することがわかる。また, 不規則波の Run-up の傾向において, 断面の形状および勾配によりさほど明らかな差は見られない。また Run-down においても, 一様断面の勾配による変化はあまり見出せない。しかし, 不規則波の場合においても, 規則波に対する著者らの他の研究結果³⁾と同様に $2.0 < \xi < 3.0$ で Run-down の減少傾向が著しいことから, 断面の複合化は Run-up より Run-down に大きい影響を与えることが見うけられる。

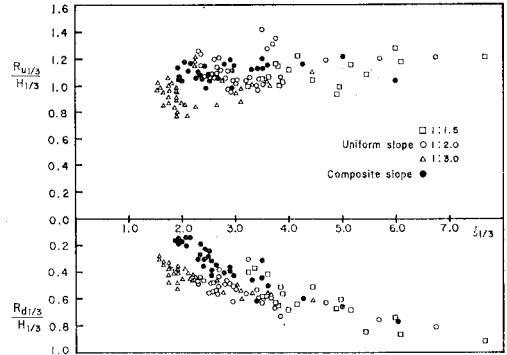


図-6 不規則波の Run-up, Run-down

5. 結 語

以上, 捨石堤の破壊後の平衡断面特性を Model 化した複合断面捨石堤の低反射効果を中心に波浪制御機能について論議した。そして複合断面による低反射効果が低反射岸壁の遊水部と同様, 波の位相干渉により説明できることを明らかにし, 不規則波に対しても同一仮想勾配に対して 50% 程度の低反射機能を有することが判明した。また, 複合断面の低反射効果を有効に応用するためには不規則波の Peak 周波数に対する沖波波長 (L_{0p}) と平坦部の長さの関係を $l_p \equiv 0.2L_{0p}$ にすることと共に平坦部水深は $0.5 < H_{1/3} < 1$ 程度にしておく必要があるといえよう。

このような複合断面捨石堤の低反射効果は反射波が問題となる海域の静穏化の面からも捨石堤が新たに見えおすべき工法といえよう。

参 考 文 献

- 1) Bruun, P. and A. R. Günbak: Hydraulic and friction parameters affecting the stability of rubble mounds, PIANC Bull., 24, pp. 33~46, 1976.
- 2) Sawaragi, T.: Scoring due to wave at the toe of permeable coastal structure, Proc. of 10th ICCE, pp. 1036~1047, 1966.
- 3) 榎木 亨・柳 青魯: 捨石防波堤の複合断面設計に関する基礎的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 361~365, 1983.
- 4) 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人: 不規則波による捨石防波堤の破壊特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 562~566, 1984.
- 5) 木村 晃: 不規則波浪のシミュレーションと発生波の特性に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 5~42, 1978.
- 6) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研資料, No. 248, pp. 1~24, 1976.