

捨石防波堤の複合断面設計に関する基礎的研究

榎 木 亨*・柳 青 魯**

1. ま え が き

近年、捨石防波堤の安定条件の論議において波の周期の影響および斜面上の共振現象が重要な支配要素であることはすでに Bruun および著者らによって指摘されてきている^{1),2),3)}。さらに著者らは、一様法面勾配捨石防波堤の破壊限界について検討を加え、高波の持続時間の効果および破壊後の平衡勾配の存在を示唆した^{3),4)}。本研究では、これらの研究成果をふまえて、入射波特性による平衡断面の特性を論議し、それを応用した捨石防波堤の安定断面形状として複合断面捨石防波堤を取りあげ、被覆工の安定条件および斜面上の流れ特性に対する断面諸元の効果を明らかにしようとしたものである。すなわち、i) 防波堤斜面上の共振現象等によって生じる激しい破壊力（砕波衝撃力、揚力、斜面上の水粒子速度の増大による流体力の増大等）の低減効果に関する比較検討、ii) 反射波および遡上波の低減効果に関する比較検討を行い、これらの結果をもとに複合断面捨石防波堤の有用性および水理学的最適複合断面諸元に関して論じることによって、設計上の基本指針を与えようとしたものである。

2. 水理実験および解析方法

2.1 実験諸元および実験方法

実験は入射波と捨石堤の破壊状況が同時に測定できるように片面ガラス張りの2次元水槽の中央部に隔壁板を設けて2分割し、ガラス張り側に模型防波堤を作って実験を行い、他方においては防波堤設置前の条件での入射波特性を測定した。防波堤の被覆層は砕石、 $\bar{W}_{cap}=20\text{ g}$ を層厚、 $r/l=2.0$ (r =層の厚さ、 l =被覆工の代表径)になるように自然落下させて下部から積み上げた。Core部は $l<0.5\text{ cm}$ の小石、被覆層とCore部の間にFilter層として $1.0\text{ cm}\leq l\leq 1.5\text{ cm}$ の砕石を一層($r/l=1.0$)設けて防波堤を構成した。防波堤斜面は図-1に示されてい

るように一様断面(a)の場合と複合断面(b)の場合を対象に取りあげ、それぞれの構造物諸元は表-1のように変化させた。入射波は周期(T)、 $0.8\text{ s}\sim 2.0\text{ s}$ (0.1 s 間隔)で各周期に対して波高(H_i)を徐々に増大させて破壊限界を求めるとともにおのおののCaseにおいて斜面上のRun-up, Run-downおよび反射波を測定した。なお、破壊が生じるケースにおいては遡上波にスポンジ製のTracer($\gamma_s=1.0$:比重)を投入、Tracerの動きと被

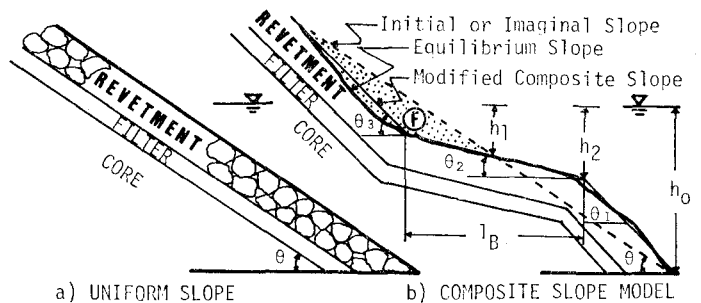


図-1 防波堤の模式図

表-1 実験条件

General condition	Modified property of composite slope					
	h_1 (cm)	l_B (cm)	θ_1	θ_2	θ_3	θ'
W_{cap} : 20 g ($l=2.0\text{ cm}$)						
l_{filter} : 1.0-1.5 cm	5	15	1:1.5	0	1:1.5	1:2.0
l_{core} : <0.5 cm	5	25	1:1.5	0	1:1.5	1:2.3
r/l : 2.0	5	30	1:1.5	0	1:1.5	1:2.5
h_0 : 20 cm	5	35	1:1.5	0	1:1.5	1:2.7
T : 0.8-2.0 s	10	15	1:1.5	0	1:1.5	1:2.0
	10	25	1:1.5	0	1:1.5	1:2.3
H_i : 3.0-15 cm	10	30	1:1.5	0	1:1.5	1:2.5
θ : 1:1.5, 1:2, 1:3	10	35	1:1.5	0	1:1.5	1:2.7

覆石の動きを16mm高速Cine-cameraで撮影(50 frame/s)し、それらの写真解析によって斜面上の水粒子速度および破壊状況を測定した。

2.2 反射率(K_r)および破壊率(D)の算定

捨石防波堤斜面上の反射率の算定は入射波高(H_i)と防波堤前面の最大水面変動量($\eta_{max}=H_i+H_r$, H_r : 反射波高)を測定し、Healyの考え方から次式によって求めた。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{\eta_{\max} - H_i}{H_i} \dots\dots\dots(1)$$

一方、捨石防波堤の安定性を論議する場合、重要なのは破壊および破壊率の定義であるが³⁾、本研究では破壊が Core 部に進行する直前の限界破壊をもって 100% Damage とし(図-1(b)の⑤)、その時の破壊個数(F)との割合で破壊率を算定した。なお、破壊の定義は被覆工の代表径(l)以上の距離を動いた被覆工とし、Rocking は破壊に考慮しなかった。複合断面の場合にも一様断面時との比較の便利を考えて一様断面時の 100% Damage 時を基準として破壊の度合を次式によって求めた。

$$\text{破壊率}(D\%) = \frac{\text{破壊個数}(A)}{\left(\begin{array}{l} \text{一様断面時の破壊が Core 部に} \\ \text{進行するまでの破壊個数}(F) \end{array} \right)} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

2.3 平衡断面の形状特性の測定

高波($H_i \geq H_{D=0\%}$)の持続時間効果に関する著者らの先の論議³⁾のように破壊は作用波数、 $t/T=500 \sim 1000$ (t : 持続時間)でそれ以上進行しない。ここでは $t/T \geq 1000$ の条件で破壊が完全に進行しない状態を確認してから断面の形状を測定した。論議の便利のため、図-1(b)に示されているように断面を3つに分割し、それぞれの諸元($\theta_1, \theta_2, \theta_3, l_B, h_1, h_2$)を測定した。

3. 捨石防波堤の破壊後の平衡断面の性質および複合断面捨石防波堤の Model 化

捨石防波堤が破壊する時、斜面上の被覆工は任意の外力に対して平衡断面において安定になる。この平衡断面の性質を明らかにすることは捨石堤の設計において、特に破壊率($D\%$)を考慮する設計方式を採用する場合に重要なものとなるであろう。本研究では、一つの入射波周期に対して一つの平衡断面が得られたが、各斜面勾配別の平衡断面の特性値に対する平均値および標準偏差(σ)が表-2に示されている。表-2により破壊が進行することによって θ_1 および θ_3 は初期勾配(θ)よりだんだん急勾配に、 θ_2 は緩勾配になり水平に近づく傾向をもつ。同時に水平部の長さ l_B は長くなっていくことがわかる。なお、これらの値は初期勾配(θ)によって変化し $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は初期勾配に応じた勾配順に変化している。

表-2 平衡断面の形状特性

θ	S.P.	$\bar{\theta}_1$ ($^\circ$)	$\bar{\theta}_2$ ($^\circ$)	$\bar{l}_B$ (cm)	$\bar{\theta}_3$ ($^\circ$)	$\bar{h}_1$ (cm)	$\bar{h}_2$ (cm)
1:1.5 (34 $^\circ$)	Mean	47.2	17.2	23.5	50.0	5.6	11.1
	σ	1.7	3.0	2.7	1.8	0.9	0.9
1:1.2 (27 $^\circ$)	Mean	39.6	11.7	29.0	38.1	5.3	9.4
	σ	2.6	1.4	3.0	1.8	0.4	1.8
1:3.0 (18 $^\circ$)	Mean	28.7	10.5	39.4	28.4	4.0	9.3
	σ	1.4	1.5	4.3	0.7	0.3	1.0

ここで θ_1 は破壊力の小さい、水深の深い領域の勾配であり、破壊された石の堆積によって支配される勾配である。また θ_3 は Run-up 高と h_1 および l_B で従属的に決められる量と考えられるが、ここでは主として h_1, h_2 および l_B の変動特性に関して論議する。 h_1 と h_2 は初期勾配が緩勾配ほど浅くなる傾向をもつものの θ の変化にもかかわらず値はほとんど同じ値を示す。なお、標準偏差も小さく入射波特性によっても変化の少ない $h_1=(0.5 \sim 0.4)H_i$, $h_2=(0.9-1.1)H_i$ であることが実験によって認められた。

一方、 l_B については初期勾配による変化の大きさとともに θ における標準偏差(σ)も比較的に大きい値を示す。 l_B の影響 Parameter に関する次元解析の結果、本実験の条件下で l_B/L_0 については次式のような無次元量が得られる。

$$l_B/L_0 = f(H_i/L_0, H_i/h_0, \theta) \dots\dots\dots(3)$$

ここで L_0 は沖波波長、 h_0 は法先水深、 θ は初期勾配である。式(3)で $H_i/h_0 \approx 0.5$ の入射波に対する $l_B/L_0 - H_i/L_0$ の関係を初期勾配別に示したものが図-2である。

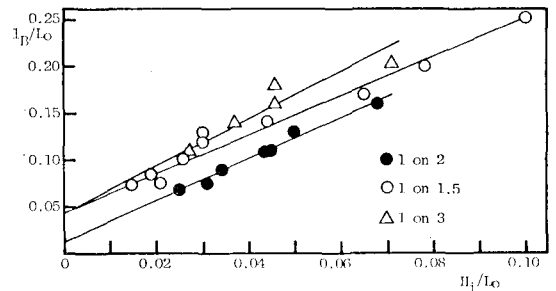
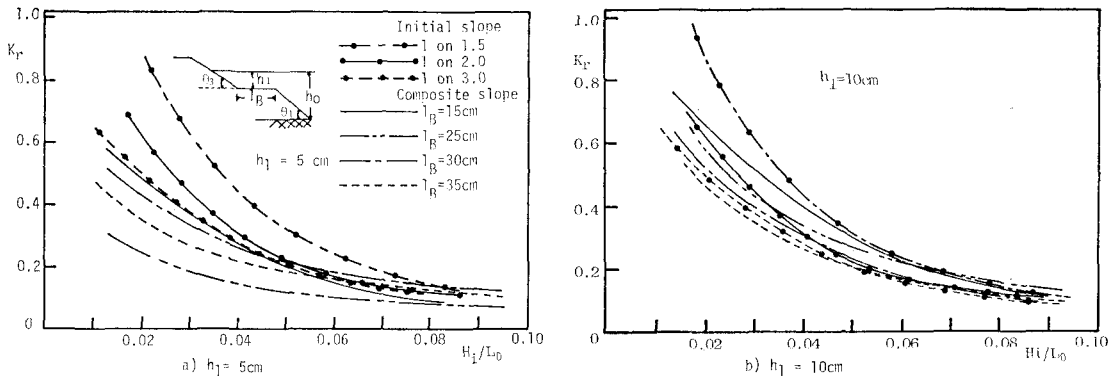


図-2 平衡断面の平坦部の長さの変動特性

る。同図において l_B/L_0 は θ の変化によって異なり、また、いずれの初期勾配においても波形勾配の増大とともに l_B/L_0 は大きくなる傾向が見うけられるが、一般の風浪の場合 $l_B/L_0 \leq 0.25$ と考えてさしつかえないようである。この様な平衡断面の形成機構を水粒子速度分布と被覆工の摩擦力の面で考察した著者らの先の論議⁴⁾を参考にし、平衡断面の性質を応用した構造形式の有用性の検証および最適構造諸元の検討のため、表-2をもとに Model 化した複合断面防波堤の諸元が表-1の実験条件に示されている。ここで、平坦部の長さ(l_B)は仮想勾配(θ')を1:2に保つようにした15cm, 1:1.5の一樣斜面で得られた平衡断面の長さの平均値($\bar{l}_B=23.5$ cm)から25cm, 1:2で得られた $\bar{l}_B \approx 30$ cm および35cmを設定した。複合断面平坦部の深さ(h_1)は平衡断面での $\bar{h}_1, \bar{h}_2$ から $h_1=5$ cm, 10cmと変化させて Model 化し、 θ_1 と θ_3 は1:1.5に固定し、 θ_2 は水平にした複合断面捨石堤を構成することにした。



図—3 反射波の変動特性

4. 複合断面捨石防波堤の破壊特性

4.1 複合断面化による斜面上の流れ特性の変動

4.1.1 反射波の変動特性

まず一様断面の捨石堤斜面上と上述のような複合断面上の反射波特性を比較検討する。図—3 (a), (b) はそれぞれ $h_1=5$ cm, $h_1=10$ cm の場合における平坦部の長さ (l_B) の差異による反射率 (K_r) の変化と一様勾配上の反射率とを同時に比較したものである。同図から h_1 と l_B の諸元によって反射率の変動は著しく、反射波の低減効果を考慮する場合には h_1 および l_B の最適値に関する論議が必要となろう。

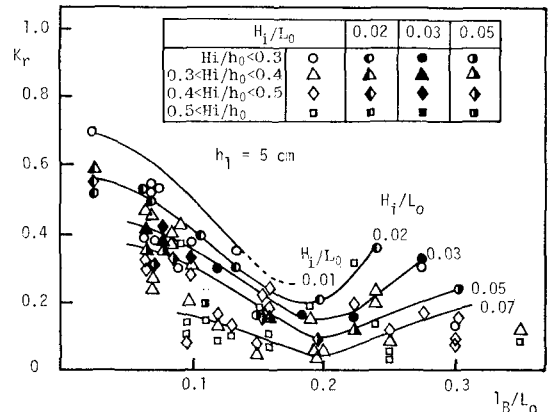
まず l_B の変化による反射波特性について検討する。図—3 (b) の $h_1=10$ cm の場合には l_B の長いほど反射率の小さい傾向を示しているが、図—3 (a) の $h_1=5$ cm の場合には波形勾配 (H_1/L_0) にかかわらず $l_B=25$ cm の時 K_r は最小値を示し、 l_B がそれより長くなっても短くなっても反射率が大きくなっている。また、 $H_1/L_0 < 0.05$ の領域で K_r の最も大きかった $l_B=15$ cm の Case が $l_B=30$ cm, 35 cm の Case よりも小さい K_r をとっている。

一方、図—3 の(a)と(b)で $h_1=5$ cm の場合が $h_1=10$ cm の場合に比して 40~200% も反射率が小さくなり、 l_B と同時に h_1 が反射波に対して強い影響を与えることが分かる。

次に、これら複合断面の反射波特性と一様断面上の反射波特性を比較する。図—3 (b) の $h_1=10$ cm の場合の K_r の変動は一様断面 (1:1.5, 1:2, 1:3) の K_r よりやや小さい値を示すが反射波低減の効果はさほどよくない。一方、図—3 (a) の $h_1=5$ cm の Case では反射率が一様断面時に比して 1/10~1/2 程度となり、 h_1 および l_B を、最適値をとることによって、反射波の低減の面でも非常に有効な工法として取り挙げられよう。

このような反射波低減の原因としては次のようなことが考えられる。i) 複合断面平坦部での砕波および斜面粗

度による Energy 逸散が一様断面時に比して大きくなる。ii) 反射波源が θ_1 の斜面上と θ_2 の斜面上の 2 つであり、その位相差が堤前方の水面変動量に影響を与えるものと考えられる。すなわち、複合断面の平坦部が低反射岸壁等で用いられている遊水部の役割をはたすためと思われる。上述の i) 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。また、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影響についてはそれほど大きく影響されていないことからここではまず ii) の原因のみについて以下検討することにする。 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_1/h_0 と H_1/L_0 を Parameter に取って K_r-l_B/L_0 の関係を調べたのが図—4 である。同図からわかるように波形勾配の小さいほど反射率が大きく現われる一般的傾向は同じものの、 $l_B/L_0 \approx 0.2$ で極小値の K_r を示す傾向はいずれの波形勾配に対しても同一である。これは樫木・岩田⁶⁾ の低反射岸壁の遊水部の消波効果に関する報告における K_r-l/L (l : 遊水部長さ) の関係と同じ消波特性を示すものと考えられる。ここで K_r の極小値分布の本研究での $l_B/L_0 \approx 0.2$ と樫木・岩田の $l/L=0.25$ の差は本研究では L_0 表示をしているためと l_B が平坦部の長さであ


 図—4 複合断面平坦部の長さ (l_B/L_0) と反射率 (K_r)

り、上・下部の斜面における反射点間の距離ではないことが原因であろう。これらの結果から複合断面化による消波効果は大きいものであり、特に斜面上で碎波が生じない波に対して大きい効果が見られることから著者らが先に報告した様な⁷⁾ 反射波による被覆工破壊への影響の低減および防波堤周辺海域の静穏化の面からも新たに見直すべき工法と言えよう。

4.1.2 Run-up, Run-down の変動特性

防波堤斜面上の Run-up, Run-down の論議は防波堤の天端高の決定における基本的な資料であると同時に著者らが先に論議した⁹⁾ 共振現象と密接な関係である。図—5 は $R_u/H_i - \xi$ の関係を調べたものである。ここでは Surf similarity parameter であり次式のようなのである。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \tan \theta / \sqrt{H_i/L_0}, \quad (\text{一様断面}) \\ \xi &= \tan \theta' / \sqrt{H_i/L_0}, \quad (\text{複合断面}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで θ は一様断面の斜面勾配、 θ' は複合断面の仮想斜面勾配である。まず複合断面の l_B が Run-up, Run-down におよぼす影響を検討する。図—5 (a) の $h_1=5$ cm の場合、 R_u/H_i は ξ によって左右され ξ の増大とともに増大するが l_B の値によってはほとんど差が見られず $\xi > 3.5$ ではほぼ一定値の $R_u/H_i=1.4$ 程度である。 R_d/H_i についても ξ に対して Run-up と同様の傾向であり l_B が長いほど小さくなる傾向を示し、 l_B の長さは Run-up よりも Run-down に大きく影響するものと観察される。一方、図—5 (b) の $h_1=10$ cm の場合には Run-up, Run-down とも l_B による変化は見られない。

次に、平坦部の深さ (h_1) が Run-up, Run-down に及ぼす影響について検討してみよう。Run-up は h_1 の変化にもかかわらずほとんど同じ値を示すが Run-down は h_1 の変化に大きく影響され、 $h_1=5$ cm の場合が $h_1=10$ cm の場合に比して 20~50% も小さくなるのがわかる。

最後に 図—5 の一様断面時と複合断面時の比較において、 $h_1=5$ cm の Case では Run-up で 10~15% ほど小さくなり、Run-down は l_B の変化によって 20~50% ほど小さくなっている。しかし、 $h_1=10$ cm の場合には

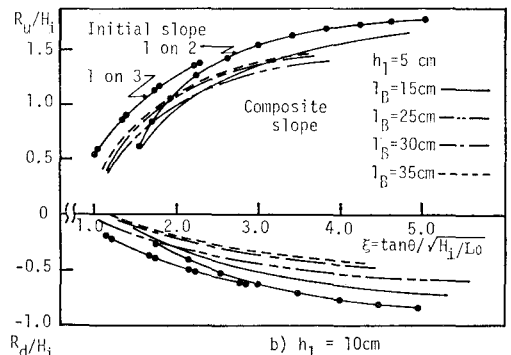
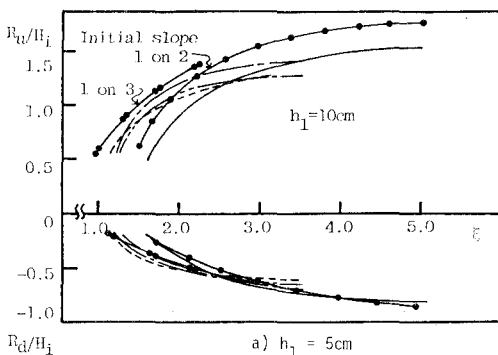
一様断面と比してわずかな低減効果しか得られない。これらの性質をとりまとめると次のようである。i) Run-up において l_B と h_1 の変化はそれほど影響しない。ii) Run-down においては h_1 が H_i より深い時には l_B の変化に無関係であるが $h_1 \approx H_i/2$ になると l_B が長いほど Run-down は小さくなる。なお、 $H_i/2 \leq h_1 \leq H_i$ の領域においては h_1 が深いほど Run-down も大きくなる性質をもち、先述の反射波の場合と同様に、今度は低天端高防波堤の実現および斜面上の共振諸象の発生条件の一つである Run-down が低い条件を満たされない面での l_B, h_1 の決定が重要になると言えよう。

4.2 複合断面捨石防波堤の破壊限界

次に上述の流れ特性における l_B, h_1 の影響が被覆工の安定性にはどのような影響を与えるのかについて論議していく。図—6 は、一様勾配の 0% Damage の場合および 100% Damage の時の $N_s - \xi$ の関係と複合断面時の l_B の変化による $D=0\%$, $D=20\%$ 時の $N_s - \xi$ の関係を比較のため同一の図に併示したものである。(a) は $h_1=5$ cm, (b) は $h_1=10$ cm の場合であり、ここで N_s は安定度を表す係数で次式によって与えられる値である。

$$N_s = \gamma_r^{1/3} H_i / (\gamma_r \gamma_w - 1) W_{cap}^{1/3} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \dots (5)$$

ここで γ_r は石の比重 (2.65), γ_w は水の比重, W_{cap} は被覆工の重量であり、 K_D は Hudson 公式⁹⁾ の被覆材の形状および被害率によって定まる定数である。なお複合断面時の ξ の計算には仮想斜面勾配 (θ') を用いた。同図において $h_1=10$ cm の場合でも安定性がかなり高くなっているが $h_1=5$ cm の場合には非常に安定性が高まっている。特に破壊率の大きい領域では一様断面時の 100% Damage を生じせしめる波高によっていずれの断面諸元をもった複合断面においても 20% Damage にも達しないことから複合断面化による捨石堤の安定設計が十分うかがえよう。また、前述の流れ特性と同様に断面諸元によって安定性は変化し、 h_1 の影響は 図—6 (a) と (b) を比較して見るといずれの破壊率 ($D\%$) および l_B においても $h_1=5$ cm の場合が 20% 以上の安定側になり、 h_1 の



図—5 Run-up, Run-down の変動特性

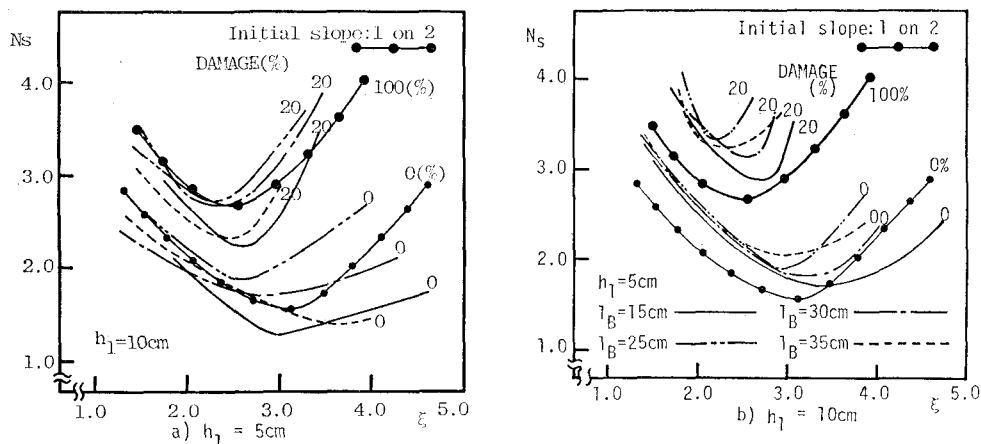


図-6 安定性の変動特性

安定性に関する効果は非常に大きいことが言える。このような現象は、i) 平坦部での砕波による衝撃力等の流体力の減少効果が h_1 が浅いほど大きくなる。ii) h_1 の浅い $h_1=5\text{cm}$ の場合の Run-down は非常に小さくなり斜面上の共振現象が生じにくい条件になり、Run-down 最下点が平坦部の上面であるため Run-down 最下点附近での巻き込み現象による揚力による破壊が生じないことに起因するものと考えられる。なお複合断面上の水粒子速度の斜面上の分布特性は一樣断面での S.W.L. 附近の鋭い分布形状が平坦部全体に滑らかな分布を示すことと、そこでの石の摩擦力はまた斜面が水平になることによって大きくなり、ますます安定性を増すことにつながっている⁴⁾。

次に、 l_B の変化による安定性の変動は 図-6 の (a)、(b) とともに $l_B=15\text{cm}$ の場合に最も不安定になり、 $l_B=25\text{cm}$ の場合はもっとも安定性が大きくなっている。したがって単に l_B を長くするだけで安定性が増すものではないと判断できる。しかしながらこの $l_B=25\text{cm}$ が何ゆえ安定性を増大さすかについては、十分な検証はできなかったが、今後さらに検討を行う必要がある。

5. 結 語

以上、捨石防波堤の水理学的最適設計の一環として、破壊後の平衡断面特性を Model 化した複合断面捨石堤を取り挙げ、断面諸元の変化による安定性および斜面上の流れ特性の変動を明らかにした。また一樣断面捨石堤との比較により、安定性および反射率の面から複合断面の長所を論じてきた。そして、反射波の制御、低天端高

の実現と安定性の増大という3つの条件から考えられる水理学的最適断面諸元に関して、特に平坦部の深さ h_1 および長さ l_B について論議したが、今後 θ_1 , θ_2 , θ_3 となる断面の勾配による影響の検討および不規則波への適用方法に関する論議を加えたいと考えている。最後に本研究の実験に協力していただいた大阪大学大学院の楠見正人君と研究生の米谷浩一君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Bruun, P. and A. Günbak: New design principles for rubble mound structures, Proc. 15th Conf. ICCE, ASCE, pp. 2429~2473, 1976.
- 2) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德: 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 428~432, 1982.
- 3) Sawaragi, T., K. Iwata and C. Ryu: Considerations of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to the resonance phenomenon, 8th Int. Harbor Cong., pp. 3.197~3.208, 1983.
- 4) 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人: 捨石防波堤の平衡断面の形成機構及びその形状特性に関する考察, 第38回土木学会年次講演会講演概要集(II), 1983.
- 5) 榎木 亨・柳 青魯: 捨石防波堤の被災プロセスと被災確率との関係について, 第19回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 97~98, 1982.
- 6) 榎木 亨・岩田好一朗: 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, 1973.
- 7) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德: 捨石防波堤の破壊限界に関する一考察, 第37回土木学会年次学術講演会講演概要集(II), pp. 829~830, 1982.
- 8) Hudson, R. Y.: Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, ASCE, Jour. of Waterways and Harbor Div., WW3, pp. 93~121, 1959.