

大阪大学工学部 正員 榎木 亨
 大阪大学大学院 学生員 ○柳 青貴
 大阪大学大学院 学生員 楠見 正人

1. まえがき: 捨石防波堤が破壊するとき、移動した被覆工は任意の外力に対して平衡断面において安定する¹⁾。そ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。本研究では詳細な水理実験をもとに平衡断面の性質について斜面上の流速分布の変動から論議すると共に任意外力によって形成される平衡断面の形状の予測手法に関して検討する。

2. 実験方法: 実験は入射波と被覆工の破壊状況が同時に測定できるように水槽の中央部に隔壁板を設け2分割して行なった。斜面上の水粒子速度及び被覆石の動きは16mm Cine Cameraによる写真解析によって主に行ない、流速の測定においてはMini Propeller typeの流速計をも用いた。なお防波堤の法先水深($h_0=20\text{cm}$)と水底勾配($1/40$)は固定して行なった。入射波は周期0.8~2.0^{sec}(0.1^s間隔)で各周期に対して波高を徐々に増大させて破壊限界を求めた。被覆層は碎石 $W_a=20g$ を厚層2.0 ℓ (ℓ =石の代表径)になるようにし、Core部は $\ell \leq 0.5\text{cm}$ の小石、被覆層とCore部の間にFilter層として $\ell \leq 2.0\text{cm}$ の碎石を一層設けて構成した。斜面の初期勾配は1:1.5, 1:2の2種類とした。なお本研究で論議する平衡断面とは最も破壊のはげしい箇所のCore部の破壊が生じる直前状態の破壊限界($D=100\%$)を以て定義する。

3. 解析方法: 捨石堤の安定性に関する著者らの先の研究¹⁾により、破壊限界の石の単位重量(W_0)を次式のように表わせるものと仮定する。 $W_0 = \frac{S_w/z \cdot C_0 A u^2 + S_w C_m V (du/dt)}{\mu_x \cos \theta + u \sin \theta / |u|} - W_a \left(\frac{S_r - S_w}{S_r} \right) \text{-----(1)}$

ここで S_w =水の比重(1.0), S_r =被覆石の比重(2.6), C_0 =項力係数(1.0), C_m =慣性力係数(1.5), A =石の断面積, V =石の体積, μ_x =作用外力に対する摩擦係数, θ =初期斜面勾配, W_a =被覆工の空中重量, u =斜面上の水粒子速度でup-rushを正方向とする。しかしながら本式の μ_x , u 及び du/dt は斜面上の碎波斜面粗度, 透過率などによって大きく影響するものと考えられ, それらの正確な算定は困難である。本研究では u と du/dt が微小振幅の浅海波理論によって表現できるものと仮定すると平衡断面は $W_0=0$ の条件から次式のようにえられる。 $\mu_x \cos \theta + u \sin \theta / |u| = \frac{S_w \left[\frac{1}{2} C_0 A (\sqrt{gH} \sin \varphi)^2 + C_m \cdot g \pi (H/L) \cos \varphi \right]}{W_a [(S_r - S_w)/S_r]} \text{-----(2)}$

ここで g =重力加速度, H =入射波高, L =波長である。本式の μ_x と θ はたがいに影響するからここではまず θ を初期断面の勾配とし, 初期破壊時の外力を代入して摩擦係数(μ_x)を求めた。その結果が図-1に示されている。同図からわかるように摩擦係数が斜面上の入射波特性を表わす ξ ($\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L_0}$)によって変化している。その変化の原因は主として斜面上の碎波及び共振現象など波の周期の影響による外力項の増大効果と考えられ, 先に著者らが指摘した共振現象の生じる $\xi=2\sim3$ という領域で μ_x が最も小さくなっている。なお式(1)の u , du/dt が微小振幅の浅海波理論を用いたことについて極めて疑問視されるが, その補正は先述のように極めて困難であり本研究では物理的意味はないが一つの便法として図-1を用いて斜面上の入射波特性による摩擦係数の変動を導入, 平衡勾配の勾配(θ_2)を論議することにした。

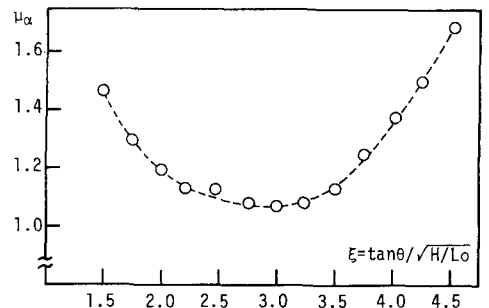


図-1. 摩擦係数(μ_x)の ξ による変化

4. 結果及び考察 図-2は数多くの実験で得られた平衡断面の形状を示した一例である。ここで平衡断面の形状特性を検討するために図-2のように断面を分割する。この平衡断面は一般的に減高が高くなり破壊が進行することによって θ_1 と θ_3 は急に、 θ_2 は平坦化され l_2 は長くなっていく。また h_2 はRun-down高(Rd)と密着な関係をもつて変化し、 $h_2=0.9\sim 1.0$ Rdであり、 l_3 はRun-up高(Ru)に影響され破壊の影響範囲は破壊の程度によってことなるが平衡勾配の場合は $0.8\sim 0.9$ Ruであることが実験によって認められた。また l_1 領域は水面下であり破壊が生じにくく、平衡断面形状において論議が必要なのは平坦部の長さ(l_2)と勾配(θ_2)であろう。それは実際の設計にこのような平衡断面の形状特性を応用しようとする場合、 l_2 での波力の消散効果及び安定力増大効果を十分考慮した設計が必要になるからでもあり、本論では主として l_2 及び θ_2 について検討する。図-3は $l_2/L_0-H/L_0$ の関係を表わしたものである。定性的にはいずれの初期勾配(θ)においても波形勾配の減少と共に l_2/L_0 は小さくなる傾向が見うけられる。なおこの l_2/L_0 は初期勾配によってことなり初期勾配の急なほど小さくなる傾向を見せる。またこの l_2/L_0 は一般の風浪では 0.25 をこえない。

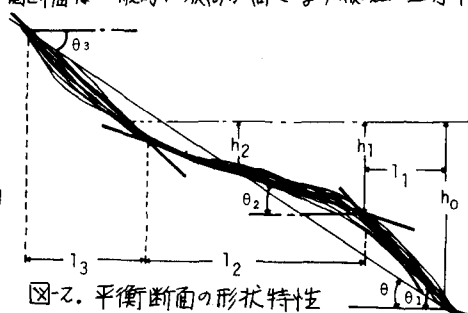


図-2. 平衡断面の形状特性

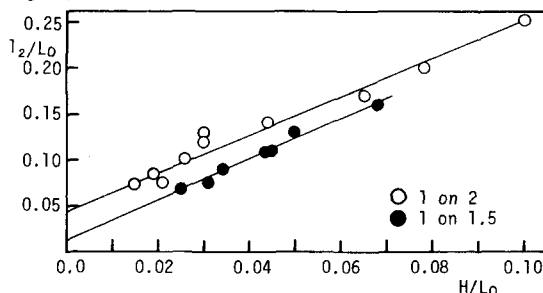


図-3. 平衡勾配の長さ(l_2/L_0)と H/L_0 の関係

一、このような平衡断面の形成メカニズムについて考えてみよう。平衡勾配形成の原因としては捲石堤の破壊が進行することによって水粒子運動が最もはげしいS.W.L.の直下部が平坦化しその部分の被覆工の抵抗力が増加して安定化に向う要因と、外力となる水粒子運動が断面の形状変化によって影響され変化することの2通りにわけて考える必要がある。そこでまず地形変化にともなう流速変動について調べて見る。図-4は斜面上の無次元流速($V_{max}/\sqrt{gH}$)の z/h_0 (z :測定点の深さ)による変動を示したもので、各測定点での全実験値に対する平均値である。同図でS.W.L.直下部の破壊前のすどい水粒子速度分布が断面の平坦化と共に流速分布も平坦になり外力の水粒子速度が断面形状の変化によって変化することがわかる。図-5は式(1)、(2)及び図-1を用いて計算した平衡断面時の θ_2 の勾配(θ_{ez})と実験結果から得られた θ_{ez} の割合($\frac{\theta_{ez}}{\theta_{ez}}$)の z/h_0 による変化を示したものである。図中の●は斜面上の実測流速値及び初期勾配 θ を用いて摩擦係数を計算($\mu=1.35$)して置き、その値を用いて式(1)から求めた θ_{ez} であり、○は式(2)と図-1によって求めた θ_{ez} である。○●がほぼ一致することから斜面上の流速及び μ を正確に求めて安定勾配を求める方法と浅海波理論にもついで図-1のように補正した μ を用いて安定勾配を求めても同一の結果が得られる。

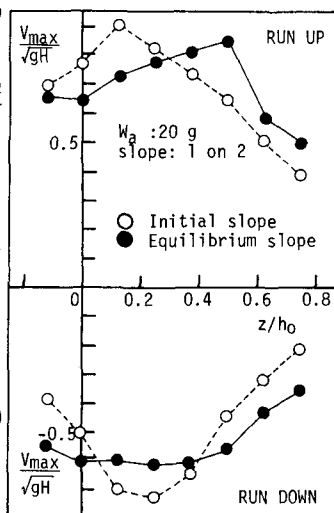


図-4. 斜面上の流速分布の変化

以上のようにこれらの現象は理論的に極めて解析しにくいことから μ をさらに各相対粗度、各透水性について調べておく他便法ではあるが、一つの安定勾配を求めることができる。

〈参考文献〉

1) 樺木・柳・大西: 捲石堤の共振現象による破壊機構, 29回海研PP-428-432.

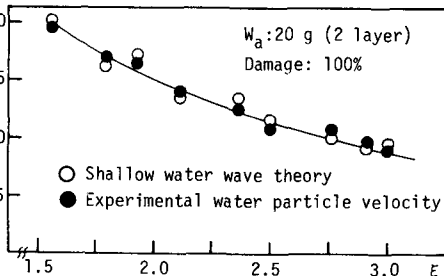


図-5. θ_2 の解析値と実験値の割合と z/h_0