

不規則波に対する捨石堤の設計手法に関する研究

榎 木 亨^{*}・柳 青 魯^{**}・楠 見 正 人^{***}

1. ま え が き

捨石堤の被覆材の重量算定に関する従来の設計式においては、代表波高として不規則波の $H_{\max}$, $H_{1/10}$, $H_{1/3}$, 等の統計波高を用いて設計することが多い。しかし、この代表波高をいつれの値に決定するかが問題であり、設計波のとり方によっては、Hudson 公式を使うならば捨石の重量が 2~8 倍も異なることは衆知の事実である。

このような問題は本質的に規則波の条件で導かれた従来の設計式を、不規則波に適用しようとするために生じる問題であるが、不規則波の特性による安定性の評価が十分行われていない現在、やむをえない結果ともいえる。

著者らは、ここ数年にわたり捨石堤の破壊機構の解明に取組み^{1),2),3)}、捨石堤の安定論に波の周期性の影響、波の連の影響が設計波高と同程度に大きな要素であることを指摘してきた。そして本講演会においても別報で不規則波による捨石堤の破壊機構を論述しているが⁴⁾、それによると不規則波の破壊機構は、単に波高あるいは周期を個々にとりあげるのではなく、波の連のエネルギー和であらわされる Run-sum で考えていかねばならないことを明らかにしている。

本論文は、ではこの波の連の Run-sum を用いて、いかに捨石堤の設計を行うべきかについて述べ、さらに具体的に捨石堤の重量算定例を提示していきたいと考えている。

2. 不規則波の連特性を考慮した新設計法

2.1 波の連の Run-sum と尖鋭度 Q_p の関係

著者らは別報⁴⁾において、いろいろな波の連の特性及びそれらの Run-sum と破壊率との関係について詳述したが、波の連とスペクトル形状をあらわす尖鋭度パラメータ Q_p との間には密接な関係があることが判明した。(別報 式 (6) 及び 図-3 参照)

また Run-sum (E_{sum}) と波の連長との関係 (別報

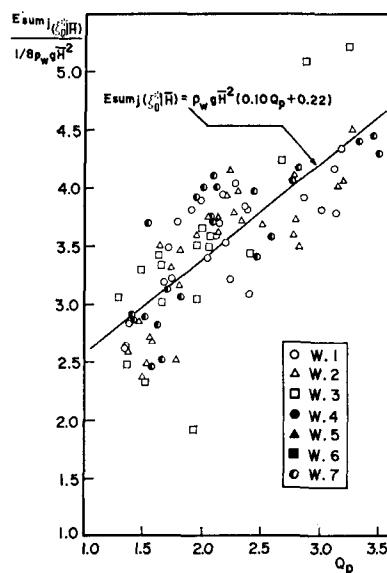


図-1 E_{sum} と Q_p の関係

図-4) も求められているが、これらの結果より、 E_{sum} と Q_p の関係を示すと 図-1 のような関係がえられる。

なお 図-1 中の記号は別報 表-1 と同じのものであり、 E_{sum} は別報式 (7) で与えられる値である。また尖鋭度パラメータは次式で与えられる。

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^\infty f \cdot S^2(f) df \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $m_0 = \int_0^\infty S(f) df$, $S(f)$ は周波数スペクトル、 f は周波数である。

図-1 の E_{sum} は $\bar{H}$ の条件つき ξ_0^* の連の Run-sum であり (参考文献 4) 参照), E_{sum} と Q_p との間には次式で示す線型関係で近似することができる。

$$E_{\text{sum}} j(\xi_0^* | \bar{H}) = \rho_w g \bar{H}^2 (0.10 Q_p + 0.22) \dots \dots (2)$$

また設定波高 H_0 を有義波高 $H_{1/3}$ に選んだ場合にも、図-1 と同様の関係図が描くことができるが、その時の E_{sum} と Q_p の関係は次式で与えられる。

$$E_{\text{sum}} j(\xi_0^* | H_{1/3}) = \rho_w g H_{1/3}^2 (0.04 Q_p + 0.13) \dots (3)$$

2.2 E_{sum} と破壊率の関係

上述の E_{sum} を用いると、不規則波の破壊率は不規則

^{*} 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

^{**} 正会員 工博 韓国釜山水産大学助教授 海洋学部海洋工学科

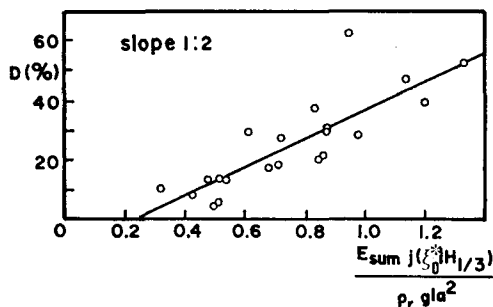
^{***} 正会員 工修 (株) 鴻池組 第2技術部

波の特性に関係なく整理できることは別報⁴⁾に述べたが、破壊率の定量的な評価は、当然のことながら被覆材の大きさを考慮した表示でもって示す必要がある。図-2(a), (b), (c)は、 E_{sum} を捨石堤の被覆材の代表径(l_a)をもつて無次元化して、その E_{sum} と破壊率($D\%$)の関係を示したものである。

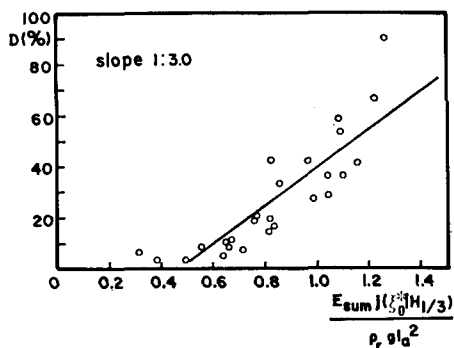
これらの図からわかるように、破壊率 $D\%$ は捨石径を考慮した無次元 E_{sum} によって容易に評価できる。この図から E_{sum} と D との関係を実験式であらわし、さらに捨石を球体と仮定すると、捨石の重量も各法面勾配ごとに次式のように求めることができる。

$$D(\%) = \frac{48.1 E_{sum} j(\xi_0^* | \bar{H})}{\rho_r g l_a^2} - 6.2$$

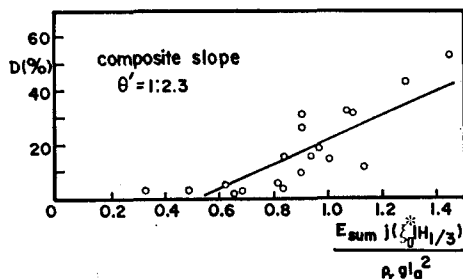
$$\approx \frac{47.4 E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3})}{\rho_r g l_a^2} \dots\dots\dots (4)$$



(a) 法面勾配 $\theta=1:2.0$ の場合



(b) 法面勾配 $\theta=1:3.0$ の場合



(c) 法面勾配 $\theta'=1:2.3$ の場合 (複合断面)

図-2 無次元 E_{sum} と破壊率 ($D\%$) の関係

$$W_a = \rho_r g l_a^3$$

$$= \left[\frac{48.1 E_{sum} j(\xi_0^* | \bar{H})}{(\rho_r g)^{1/3} (D+6.2)} \right]^{3/2}$$

$$\approx \left[\frac{47.4 E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3})}{(\rho_r g)^{1/3} (D+10.9)} \right]^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、(2)式、(3)式を用いて E_{sum} のかわりに Q_p でもって記すと次式のようになる。

$$W_a = \left[\frac{\rho_w g (4.81 Q_p + 10.58)}{(\rho_r g)^{1/3} (D+6.2)} \right]^{3/2} \cdot \bar{H}^3$$

$$\approx \left[\frac{\rho_w g (2.00 Q_p + 6.16)}{(\rho_r g)^{1/3} (D+10.9)} \right]^{3/2} \cdot H_{1/3}^3 \dots\dots\dots (6)$$

同様の手順により、 $\theta=1:3$ 及び複合断面($\theta'=1:2.3$)に対して整理すると次式のようになる。

$$W_a = \left[\frac{\rho_w g (3.12 Q_p + 9.65)}{(\rho_r g)^{1/3} (D+34.8)} \right]^{3/2} \cdot H_{1/3}^3$$

for Slope 1:3.0 $\dots\dots\dots (7)$

$$W_a = \left[\frac{\rho_w g (1.89 Q_p + 5.85)}{(\rho_r g)^{1/3} (D+23.0)} \right]^{3/2} \cdot H_{1/3}^3$$

for 複合断面, $\theta'=1:2.3$ $\dots\dots\dots (8)$

ここに ρ_r は捨石の密度であり、複合断面というのは規則波を対象とした著者らの実験³⁾において、安定な平衡断面とした時の一様仮想勾配をあらわしている。

上記(6),(7),(8)式のように斜面の勾配別の重量算定式となっているのは、法面勾配の変化による捨石の摩擦係数を考慮しなかった為と考えられる。

また、上述のようにスペクトル尖鋭度パラメーター Q_p は捨石の安定性に重要な影響を与えている。ここで、 Q_p による設計捨石重量の変化を示したのが図-3である。同図からわかるように、 Q_p の大きいほど捨石重量

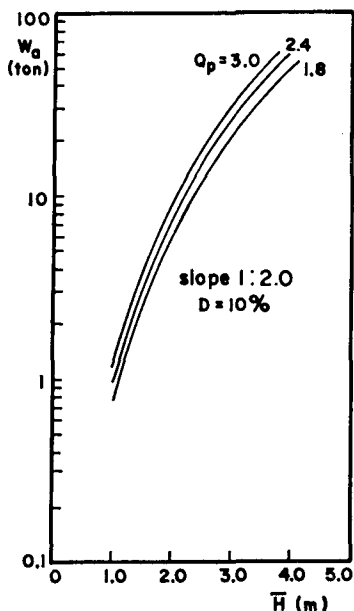


図-3 Q_p の変化にともなう破壊材重量 (W_a) の変化

も大きくなっていく。すなわち、 Q_p の大きいほど、連長の長いほど、または E_{sum} の大きいほど構造物は不安定であるといえよう。

このようにスペクトル型が捨石の安定問題に重量な要因となるということは、従来の捨石重量の算定式では考えられないことであって、今後さらに数多くの実際海岸の被災実例でもって検証する必要がある。

3. 捨石堤の設計重量算定例

ここで著者らが提案した不規則波に対する捨石堤の算定式 ((8)~(10) 式) を用いて、具体的に重量を算定し、設計波高と破壊率との関係を明らかにするとともに、従来の規則波としての設計公式 (Hudson 公式) から求められる捨石重量の比較を行い、規則波の算定結果がどの程度の破壊率に相当するかについて考察を進めていく。

図-4 は法面勾配 1:2 の場合の捨石堤をとりあげ、(6) 式を用いて、各波高と捨石重量 W_a 及び破壊率 ($D\%$) の関係を示したもので、図中 $\bar{H}$ 、 $H_{1/3}$ は波の連の設定波高 H_0 を示している。また同図には鎖線で Hudson 公式を用いた結果も示されているが、これは安定係数 $K_D = 3.0$ として算定した結果である。

同図において波の連を考える場合の設定波高を $\bar{H}$ 、

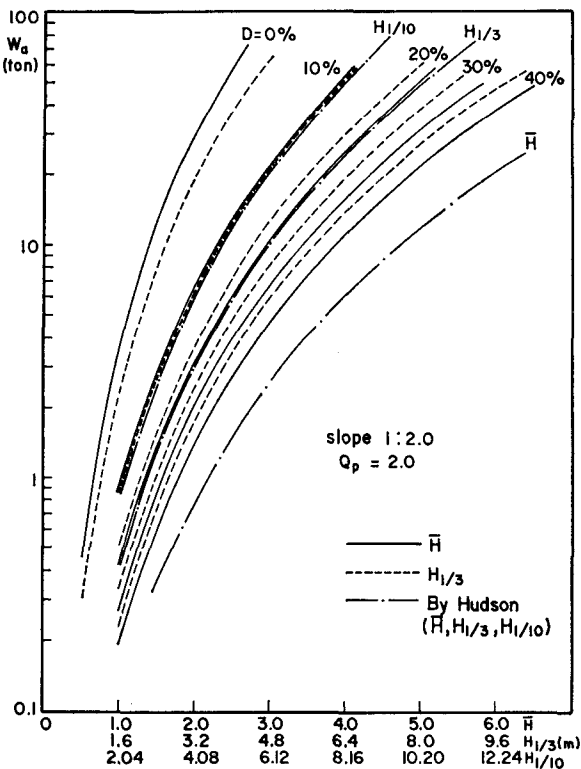


図-4 新設計式による捨石重量算定図

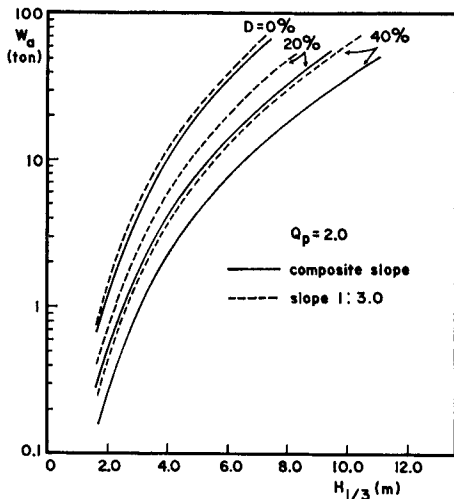
$H_{1/3}$ のいずれにとっても、同じ破壊率の重量を比較するとほとんど変化は認められないのに対し、Hudson 公式に基づく従来公式は、 $H_{1/10}$ を用いた場合と $H_{1/3}$ を用いた場合とでは、約 2 倍もの重量が異なってくる。このことは新算定法においては設計対象波高を従来の様に $1/10$ 最大波にとるべきか、有義波に選ぶべきかといったことに悩む必要がなく、近年充足しつつある現地波浪の観測結果を、そのまま適用できることになる。

なお (6)~(8) 式及び 図-4 からわかる様に、 W_a は波高の 3 乗に比例する Hudson 公式と同様の形をとり、従来の捨石算定式が物理的には間違がなかったことを示している。また Hudson 公式の設計波高が、どの程度の破壊率を示しているのかについて考察してみると、 $H_{1/10}$ が新算定法の破壊率 10%、 $H_{1/3}$ が 20% の破壊率にほぼ相当していることがわかる。ここでいう破壊率 ($D\%$) は著者らが従来定義している断面変化から求めた値であって、従来の被覆個数の移動で定義する破壊率に換算する場合には別報⁹⁾ 表-2 を参照していただきたい。

以上の様に新しい捨石重量算定式は、その設計波高を如何に決定すべきかについては、それほど悩む必要はないが、破壊率をどの程度まで許容し得るかについてなお問題が残されている。許容破壊率に関する研究は従来において皆無といつてよく、今後その研究の進展が望まれるが、この許容破壊率が確立されると、この新しい算定方式は益々その効果を発揮するものと思われる。

つぎに、複合断面捨石堤と一様断面捨石堤の安定性に対する検討を、この新しい算定式を用いて行なってみよう。著者らは、先に捨石堤の破壊後の平衡勾配が複合断面形状をとることから、規則波に対する複合断面設計に対して一つの提案を行っている。(参考文献 3) 参照) その断面形をとった場合、堤の法尻と堤体上の波のうち上げ高とを一様勾配で結んだ仮想勾配は、ほぼ 1:2.3 となるので、この勾配に対する重量算定値と、複合断面勾配より緩やかな 1:3.0 の一様勾配の捨石堤の重量比較を行ったのが 図-5 である。同図には各破壊率別に算定重量が求められているが、破壊率が大きいほど、複合断面の捨石重量は、より法面勾配の緩やかな一様勾配の捨石重量より軽い値を示し、複合断面設計の有用性を示唆している。

なおこの複合断面の捨石堤の有用性は、単に捨石堤の安定に関する論議だけでなく、複合断面の平坦部の効果により、あたかも低反射防波堤の遊水部の効果と同程度の効果をもつ場合があり、複合断面捨石部の上部斜面、下部斜面での反射波間の位相干渉効果により、期待以上の消波効果を示すが、これに



図—5 複合断面と一様断面の捨石重量の比較

については稿を更めて論述したい。

5. 結 語

以上不規則波による安定実験結果を基礎として、不規則波の特性、すなわちスペクトルの形状、各種の連の特性、砕波を含む surf similarity parameter の効果を総括的にとり入れた新しい設計方法を提案し、その有用性について具体的な重量算定から論議を進めてきた。そして

従来十分な決手のない設計波高の決定を考えることのない重量算定法の特長について、規則波の算定値との対応によって明らかにしてきた。しかしなお本論文においては、論文でふれた様に捨石間の摩擦係数の十分な考慮が払われておらず、なお本算定法の実用化に当っては検討しなければならない問題が残されている。しかしながら、近年不規則波を対象とした安定実験が数多く行われているにもかかわらず、代表波高（設計波高）をいかなる値にとるべきかという論議に終始している不規則波の設計への適用に対して、新しい考え方を提案したものと考えている。最後に本研究に協力していただいた当時学部学生であった戸田功君に謝意を表するとともに、本研究が文部省科学研究費（代表 岩田好一郎）の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Sawaragi, T., C. Ryu and K. Iwata: Consideration of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to resonance phenomenon, Proc. of 8th Int. Harbor Congress, pp. 3197~3208, 1983.
- 2) 棋木 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 回海講, pp. 428~432, 1982.
- 3) 棋木 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 回海講, pp. 361~365, 1983.
- 4) 棋木 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 回海講, pp. 562~566, 1984.