

不規則波力を導入した捨石堤の新設計手法

柳 青 魯*・ 榎 木 亨**・ 金 崇 慶***・ 張 善 徳****

1. ま え が き

最近、捨石堤の設計において捨石の安定に対する不規則波の grouping 効果及び波の周期の効果の導入が大きな問題として指摘されている^{1),2),3)}。また、従来の設計式を用いる場合には規則波的発想による設計波高の決定が必要である。この設計波高の決め方によっては捨石の重量が2～8倍にも差異を示す場合もある。なお、捨石構造物は多少の破壊が許容される破壊機構をもつため最適設計の概念から考えると当然のことながら許容破壊率を設計式に導入すべきことであるが、従来の設計式においては非常に考慮しにくくなっている。

著者らはこれらの問題点を根本的に解決しようとして前報において不規則波に対する捨石構造物の設計手法を提案したことがある^{3),4)}。著者らの前報において提案した設計式のもつ問題点として、i) 斜面傾斜の変化に関係なく一義的に安定性が表現できないから勾配別に設計式を提案していること、ii) 捨石構造物は任意の外力に対して平衡断面を形成し、その特徴に対してはすでに報告している⁵⁾。その平衡断面化による安定性の変動特性及び破壊率を設計式にいかにか考慮するかが指摘されよう。

本研究では先に提案した著者らの設計式を改良するために不規則波の周期効果を含む波の grouping 特性と構造物の初期勾配と捨石の摩擦効果が十分に考慮できる新たな捨石構造物の設計式を提案することにより、まずは一つの設計式をもって不規則波に対する設計が可能になるようにしたものである。

2. 不規則波の波力指標

捨石堤の安定性を最も精度よく表現する不規則波の波力指標として著者らが先に報告した H_c の条件付 ξ_0^* の run-sum の概念を用いることにする⁵⁾。これは高波 (H_c) の条件を満たし、なおかつ斜面上の周期の影響ともいわれる共振現象の発生条件を満たす領域の波浪を対

象にして、その波の grouping 特性を論議するのに従来の run-length の概念に加えて新たに group を形成した波の energy 和で定義した run-sum の概念を用いたものである。

著者らは前報において、平均 run-sum (E_{sum}) と平均連長 ($\bar{j}_c$) は非常によい相関性をもつことを明らかにし、次式のような相関式を実験的に求めている。

$$\frac{E_{\text{sum}} j_{(\xi_0^*|H_{1/3})}}{\frac{1}{8} \rho_w g H_{1/3}^2} = 0.78 \bar{j}_{(\xi_0^*|H_{1/3})} - 0.44 \quad \cdots (1)$$

ここで、

$$E_{\text{sum}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{8} \rho_w g H_i^2}{\sum_{j=1}^{\infty} N_j} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

N_j : 連長 j の連の総数

ρ_w : 水の密度

H_i : 連を形成する i 番目の波の波高

$j_{(\xi_0^*|H_{1/3})}$: $H_{1/3}$ の条件付 ξ_0^* の連の平均連長

ξ_0^* : $1.5 < \xi/\xi_0 = \{(\tan \theta / \sqrt{H/L_0}) / 2.65 \tan \theta\} < 2.5$

$\tan \theta$: 斜面勾配

L_0 : 沖波波長

H : 入射波高

また、式(1)に示した平均連長と spectrum peakedness parameter Q_p との関係も非常によい相関性をもつことから E_{sum} の予測に直接 Q_p を用いて次式のように表わしている。

$$E_{\text{sum}} j_{(\xi_0^*|H_c)} = \rho_w g H_{1/3}^2 (0.04 Q_p + 0.13) \quad \text{for } H_0 = H_{1/3} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、

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

$$m_0 = 0 \text{ 次 spectrum moment } \left(= \int_0^{\infty} S(f) df \right)$$

ここで不規則波力指標として定義した E_{sum} は式(1)または式(3)のような実験式から求めればよい。しかし、この E_{sum} は理論的にも十分求められる性質をもっていると考えられる。即ち、限界波高 H_c 以上の高波の発生確率は波高分布特性からわかる。また ξ_0^* の発生確率も

* 正会員 工博 韓国釜山水産大学助教授 海洋工学科

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*** 工修 韓国釜山水産大学大学院 海洋工学科

**** 正会員 理博 韓国釜山水産大学教授 海洋工学科

ξ/ξ_0 の確率分布特性から求められよう。

不規則波に対する ξ の確率分布式³⁾ から ξ/ξ_0 の確率分布式に変換すれば、 ξ/ξ_0 の確率分布 $P(\xi/\xi_0)$ は

$$P(\xi/\xi_0) = 8 \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \left(\frac{\xi}{\xi_0} \right) \exp \left\{ -2 \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \left(\frac{\xi}{\xi_0} \right)^{-4} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

になり

$$\begin{aligned} P(\xi_0^*) &= P(\xi/\xi_0 < 2.5) - P(\xi/\xi_0 < 1.5) \\ &= \left[\exp \left\{ -5.12 \times 10^{-2} \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \right\} \right. \\ &\quad \left. - \exp \left\{ -3.95 \times 10^{-1} \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \right\} \right] \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

になる。ここで、

$$\xi_a = \frac{\tan \theta}{[(2\pi/g)(H_{1/3}/T)^2]^{1/2}}$$

また、 H_c の条件付 ξ_0^* の発生確率は次式のように導くことができる。

$$\begin{aligned} P(\xi_0^* | H_c) &= \left[\exp \left\{ -5.12 \times 10^{-2} \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \right\} \right. \\ &\quad \left. - \exp \left\{ -3.95 \times 10^{-1} \left(\frac{\xi_a}{\xi_0} \right)^4 \right\} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left(\frac{-H_c^2}{8m_0} \right) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式(6)のような発生確率を用いて grouping に関する確率過程論的予測を試みた。その結果、 ξ_0^* の grouping 特性は random process でも結構よい結果が得られるが、 H_c の条件付 ξ_0^* の grouping 特性の予測にはさほどよい結果が得られなかった。今後、波の相関性を考慮する確率過程理論をもって説明すべきことと指摘しておきたい。

3. 安定性に対する摩擦係数と斜面傾斜の効果

3.1 摩擦係数の効果

著者らの中一人の他の研究成果によると安定係数 N_s と ξ_0^* の関係は surf-similarity parameter ξ による N_s の変化に比べて各破壊率に対して N_s の最小値を示す ξ_0^* の値がほぼ同一であることが明らかになった⁶⁾。しかし、 N_s の最小値は初期勾配により変化を見せ、その点を改善しないと勾配別設計の問題は解決し難いことであろう。これは当然のことながら次式で定義する安定係数 N_s には摩擦係数 (f) と斜面傾斜の効果が考慮されていないことからであろう。

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H_{D(\%)}}{(\gamma_r/\gamma_w - 1) W^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 γ_r は石の比重、 γ_w は水の比重、 W は石の重量であり、 $H_{D(\%)}$ は破壊率 $D(\%)$ 時の波高である。

これらの効果を評価するために水理実験により摩擦係数の変動を調べた。実験は水中に捨石 (quarry stone, $W=30$ g, 50 g), concrete cube ($W=100$ g), tetrapod

($W=100$ g) の材質を各々乱積することによりその安息角 (Φ) を測定した。 f は $f = \tan \Phi$ の関係から求めたが実験値は分散が生じて、30~50 回の反復実験により得られた平均摩擦係数をもって論議していくことにした。それぞれの材質に対する平均摩擦係数は捨石の場合に $f=1.09$, concrete cube の場合に $f=1.28$, tetrapod の場合 $f=1.42$ であり分散は 0.1 前後の値を示した。

一方、斜面上の一個の捨石に流速 V_r による外力が作用した時、斜面傾斜の変化による破壊に必要な力 F は図—1 を参照すると次式のように表わされる。

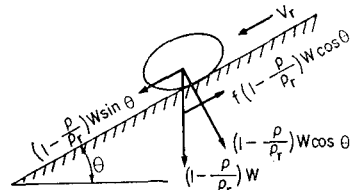
$$F = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_r} \right) W (f \cos \theta - \sin \theta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 ρ_r は捨石の密度、 W は捨石の重量、 θ は斜面傾斜角である。

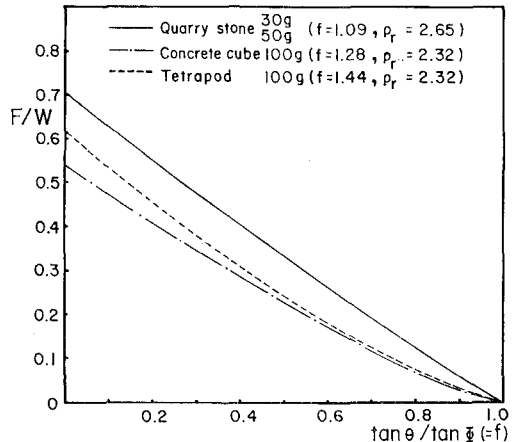
上述した実験結果による摩擦係数 (f)、密度 (ρ_r)、重量 (W) の平均値を式(8)に代入し、相対破壊力 (F/W) に対する斜面傾斜効果 ($\tan \theta / \tan \Phi$) を示したものが図—2 である。同図において両 parameter 間には摩擦係数 f の変化に関係なくほぼ直線の変化を示している。材質別にこの関係を用いると前述の材質の摩擦効果及び斜面傾斜の効果をも表現することができると考えられる。

3.2 斜面傾斜の効果

図—2 でわかるように摩擦係数の効果がほぼ直線的であることを考慮すると同じ材質に対しては安定係数 N_s



図—1 斜面上の捨石に働く力



図—2 斜面傾斜の変化による相対破壊力の変化

の変形として次式のような N_s' をもって簡単に斜面傾斜の効果を評価することができる。

$$N_s' = N_s \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \phi} \dots\dots\dots (9)$$

この新たに定義した安定係数 N_s' をもって著者ら等の他の規則波に対する実験結果¹⁾を整理しなおすと図-3のように示される。この図から見ると同じ破壊率に対し、 ξ_0^* による N_s' の変化は初期勾配の差異にもかかわらずほぼ一致していることがわかる。また、同図において破壊率の増大により N_s' の最小値を示す ξ_0^* の領域が小さくなるのはまだ破壊にともなった平衡断面形成過程の局所的な斜面変化効果が正確に評価できなかったことに基因するのであろう。しかし、従来の N_s - ξ_0^* 、または N_s - ξ の関係による安定性の評価方法よりははるかに良好な結果を示しており、この N_s' - ξ_0^* の関係を用いて捨石構造物の安定性を評価すべきことと考えられる。

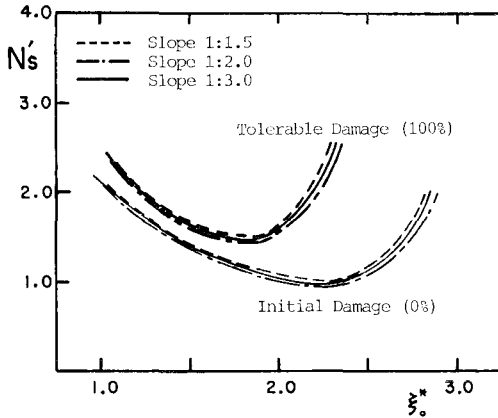


図-3 N_s' と ξ_0^* の関係

以上の概念を不規則波による安定性の表現にも応用するために、著者ら等の前報の実験結果を用いて^{3),4),5)}、捨石の特性値により無次元化した E_{sum} に $\tan \theta / \tan \phi$ をかけた parameter を相対不規則外力 parameter として考える。この相対外力 parameter と破壊率 ($D\%$) の変化を示したものが図-4である。この図には一様断面の場合と捨石構造物の破壊後の平衡断面を model 化した複合断面の場合を同時に示しており、各各の場合に対する最適線が求められている。この図から見ると、一様断面の場合と複合断面の場合において相対外力による破壊率の差は大きい、一様断面の場合、初期勾配の差異にもかかわらず破壊率の変化はさほど見うけられない。この結果から考えると不規則波に対しても一つの安定性評価式を導くことが可能であることがわかり、著者らの前報と同じ手順により一つの新しい設計式を導くのも可能であらう。

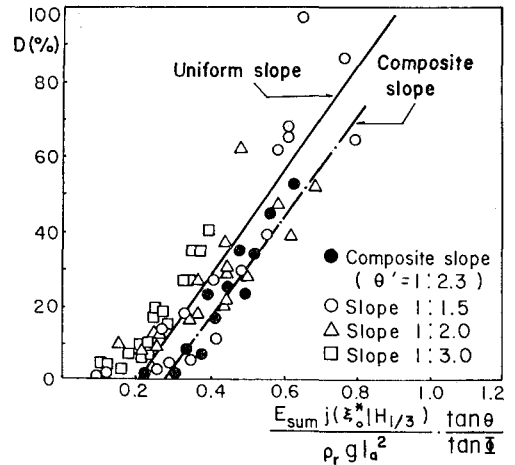


図-4 相対不規則波力による破壊率の変化

4. 不規則波に対する新たな設計手法

前述した E_{sum} と Q_p の関係を示す式(3)と図-4の関係をを用いると次のような手順で簡単に捨石の重量算定式が求められる。まず図-4より相対不規則波力に対する破壊率変化の最適線と求めると一様勾配及び複合断面に対してそれぞれ次式のように記される。

$$D(\%) = 153.8 \left[\frac{E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3}) \tan \theta}{\rho_r g l_a^2 \tan \phi} \right] - 30.1$$

for the uniform slope (10)

$$D(\%) = 136.4 \left[\frac{E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3}) \tan \theta'}{\rho_r g l_a^2 \tan \phi} \right] - 36.3$$

for the composite slope (11)

式(10)、式(11)を変形して捨石の重量に関して記すと、

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

$$= \left[\frac{153.8 E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3}) \tan \theta}{(\rho_r g)^{1/3} (D + 30.1) \tan \phi} \right]^{3/2}$$

for the uniform slope (12)

$$W = \left[\frac{136.4 E_{sum} j(\xi_0^* | H_{1/3}) \tan \theta'}{(\rho_r g)^{1/3} (D + 36.3) \tan \phi} \right]^{3/2}$$

for the composite slope (13)

のようになる。上記の式(12)、式(13)に式(3)を代入して整理すると次式のように不規則波の spectrum 尖鋭度 parameter Q_p を導入した重量算定式に変形することもできる。

$$W = \left[\frac{\rho_w g (6.15 Q_p + 20.0) \tan \theta}{(\rho_r g)^{1/3} (D + 36.3) \tan \phi} \right]^{3/2} \cdot H_{1/3}^3$$

for the uniform slope (14)

$$W = \left[\frac{\rho_w g (5.46 Q_p + 17.73) \tan \theta'}{(\rho_r g)^{1/3} (D + 36.3) \tan \phi} \right]^{3/2} \cdot H_{1/3}^3$$

for the composite slope (15)

式(14)及び式(15)を用いると不規則波の spectrum 型を代表する Q_p と有義波高 ($H_{1/3}$) となる外力因子をわかれば被覆材の材質と許容破壊率 (D) の決定により石の重量が求められる。一樣断面の場合式(14)のように任意の斜面勾配に対しても使用できる一つの設計式になっており、前述したような前報における斜面勾配別設計の問題点を改良している。

また、式(15)は複合断面に対するものであるが、この場合はあらゆる複合断面形状に適用できるものではなく前報³⁾に示したような平衡断面形成特性から、不規則波の peak 周期に対する波長 (L_p) の $1/4$ なる平坦部幅をもち、その水深 (h_B) は $0.4 H_{1/3} < h_B < 0.7 H_{1/3}$ 程度の条件下で適用できる設計式である。この条件は著者らが指摘した最適複合断面形状の条件でもある。なお式中の θ' は仮想勾配で run-up 高さから防波堤先端を結んだ勾配である。

図-5は式(14)、式(15)により求めた Q_p による相対捨石重量の変化を示したものである。同図には一樣断面の場合と複合断面の場合の破壊率 D が 0%, 20%, 60% に対して計算したものであるが、いずれも Q_p の増加と共に石の重量は大きくなることが認められる。なお、同じ破壊率に対しては複合断面の場合が安定であることが見うけられる。この傾向は当然のことながら Q_p の増加と共に不規則波中の grouping の連長が長くなり、 E_{sum} も大きくなることに基因するものであり、これらの設計式はこのような grouping 特性による安定性の変化をよく表現しているといえよう。

図-5においても認められることであるが断面の複合化により被覆石の重量がどのぐらい小さくなるかを示したのが図-6である。この図は $Q_p = 2.5$, $H_{1/3} = 7$ m の

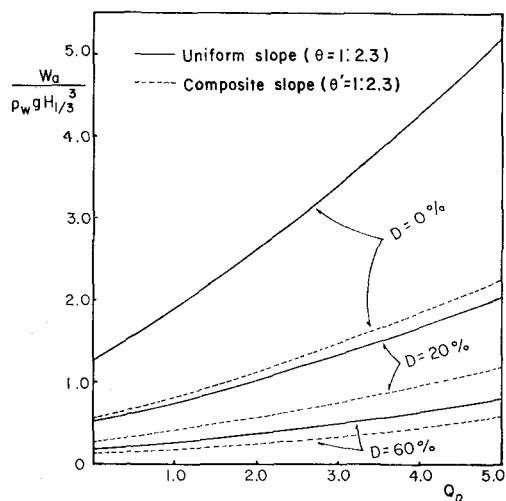


図-5 Q_p の変化による捨石相対重量の変化

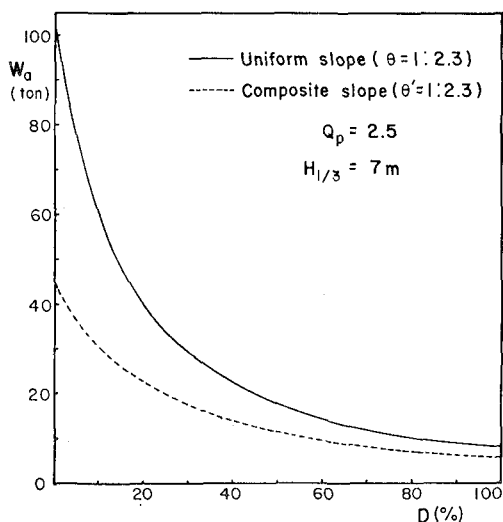


図-6 一樣断面と複合断面捨石構造物の設計重量の比較

設計条件下で許容破壊率 (D) の変化による被覆石の設計重量を計算したものである。前報でも指摘したように複合断面の場合に特に初期破壊領域においては $1/2$ 程度の重量でも十分安定であることがわかる。また、破壊率の増大にしたがってその効果は少なくなるが、安定側にあり、複合断面の波浪制御効果と結び付けて考えると³⁾、このような複合断面捨石堤の設計は有用な工法として重要な意味をもつ。

5. 結 語

不規則波力因子を直接設計外力として導入し、また捨石の摩擦効果及び初期勾配の効果を妥当に評価することにより不規則波に対する捨石構造物の設計式を提案した。この設計式は著者らの前報³⁾の結果を改良したもので一樣断面捨石構造物の場合、斜面勾配別に設計式が存在したものを一つの式にまとめたもので非常に便利な形になっている。なお、最適複合断面を考える場合の複合断面捨石構造物の設計式も提案している。

これらの設計式は従来の規則波的発想による設計方法とはまったく別のもので、設計波高の選び方に注意しなくてもいいことと、不規則波における spectrum shape, grouping 効果、波の周期効果等の不規則性による安定性をうまく表現し、許容破壊率の概念を明確に設計式に考慮したもので従来の設計方法がもつほとんどの問題点を解決した設計式と考えられる。

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) Johnson, R.P., E.P.D. Mansard and J. Ploeg: Effects of wave grouping on breakwater stability, Proc. of 16th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 2228~2243, 1978.
 - 3) Sawaragi, T., C.R. Ryu and M. Kusumi: Destruction mechanism and design of rubble mound structures by irregular waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp. 173~189, 1985.
 - 4) 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人: 不規則波に対する捨石堤の設計手法に関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 567~570, 1984.
 - 5) 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.
 - 6) 柳 青魯: 捨石防波堤の水理学的最適設計に関する基礎的研究, 大阪大学博士学位論文, 165 p., 1984.
 - 7) 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人: 複合断面捨石堤の低反射効果について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 495~499, 1985.
-