

# 不規則波の諸特性を考慮した捨石構造物の安定性評価

柳 青 魯\*・金 鉉 周\*\*

## 1. 序 論

捨石構造物の安定性に関する研究は数多く行われているが安定性変化の主要因に対する定量的な評価はまだ十分とは言えない。特に不規則な海の波の統計的特性と波群および高波の持続時間などの外力特性による影響は個々の要因に対する検討なら Ryu・Sawaragi (1986) とか van der Meer (1986) 等の結果が参考になるが総合的に評価しようとした例はないと言えよう。また構造物の建設場所、構造物の諸元および施工方法などにより安定性は大きく変化するものの、これらの影響をも体系的に評価していく設計 algorithm は見あたらない。

ここで本研究では捨石または異型 block 積み構造物の安定性評価に対する従来の研究を整理して安定性に対する影響要因、特に不規則波の作用を詳しく検討して波群特性 (spectrum 型) と高波の持続時間および波浪の統計的特性による影響の評価と設計式への導入について論議する。またその結果を従来の結果と比較しながら総合的な設計 system 開発への基本指針を与えることにする。

そのために以下のような step と内容で研究を進めていく。①従来の代表的な設計式を使用した比較設計例の検討を通じて捨石構造物の設計上の問題点について見直す。②不規則波に対する安定実験結果を総合的に整理して波群特性と波浪の持続時間による破壊率の変化を検討し、これらの効果が考慮できる安定性評価方法を開発する。③外力要素以外の重要な安定性変化の要因に対する総合整理および database 化による設計 system 構築の為の問題点を導きながらその可能性と方向に対して論議する。

## 2. 水理実験と解析方法

### 2.1 水理実験

柳 (1984) と Ryu・Sawaragi (1986) の規則波と不規則波に対する実験結果を波の波群特性と持続時間効果に関して整理しなおすために利用した。この実験は斜面勾

配 1:1.5, 1:2, 1:3 の 3 種の捨石堤を対象に model の縮尺効果を考慮して内部透水性を調節し不規則波の spectrum 型の異なる 200 case に対して行ったものである。実験は破壊が進行しない状態、即ち平衡断面になるまで波をあたえたもので平均的に 700 波程度になるがその間の破壊の進行過程を調べたものである。

また, van der Meer (1988) の透水性を変化させて行った 300 case の安定性実験結果をも新しい経験式の適用性の検証のために使うことにした。実験の詳細については各々の文献を参照されたい。

### 2.2 不規則波の外力因子の解析

外力要素になる波の解析は波別解析と spectrum 解析により行われ、時系列特性の一つである波群特性とそれによる安定性の変化を求めるために安定性に影響を大きく与える外力 parameter である波群を定義し、その波群がもつ平均 energy の特徴と不規則波の spectrum 型との関係を整理し安定性を評価する外力 parameter とする。また波の持続時間は波別解析による作用波浪数 ( $N$ ) により定義して解析する。

まず波群の平均 energy である  $E_{sum}$  は ( ) の特性を持つ波群の定義,  $j$  ( ) により次式の関係から求める。

$$E_{sum}j( ) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{8} \rho_w g H_k^2 / \sum_{j=1}^{\infty} N_j( ) \dots\dots\dots (1)$$

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

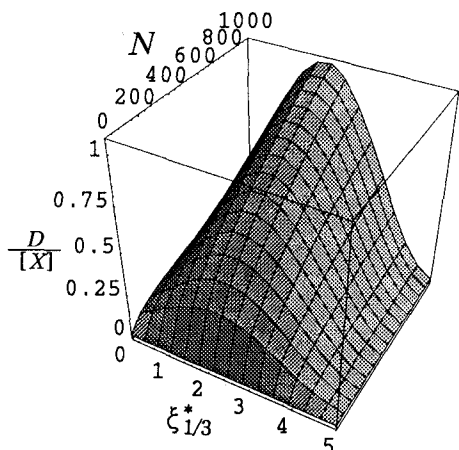
$$\xi_{1/3}^* = \frac{\xi_{1/3}}{\xi_{max}} = \frac{\tan \theta / \sqrt{H/L_0}}{\tan \theta / \sqrt{(H/L_0)_{max}}} \dots\dots\dots (3)$$

$$1.5 \leq \xi_{1/3}^* = \xi_0^* \leq 2.5 \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $\rho_w$  は海水の密度,  $H_k(k=1, 2, \dots)$  は波群の run-length  $j$  ( ) の条件を満足する波を表し,  $N_j$  は連長  $j$  の波群の数である。また  $E_{sum}j( )$  は基準になる波高  $H_c$  より大きい条件付き相対 surf-similarity parameter のある領域、すなわち破壊に影響の強い条件を満たす波群の平均 energy であり、それと spectrum peakedness parameter  $Q_p$  との関係を示したものである。ここでいろいろな  $\xi$  の表現は式 (3), (4) のように定義したものである。式 (3) は傾斜斜面上に碎波せずに存在できる極限波の  $\xi_{max}$  に対する相対値である。式 (4) は捨石

\* 正会員 工博 釜山水産大学教授 海洋工学科

\*\* 工修 釜山水産大学大学院生 海洋工学科



図一1 波の持続時間効果に関する重み関数の特徴

の安定性と関連して斜面上の共振現象の発生条件の一つになる領域の値である。Ryu・Sawaragi (1986) はこの外力に対する新しい概念を用いて捨石構造物の安定性に関する設計式を提案しているがもう一つの重要な影響因子である波の持続時間を parameter として考慮せず平衡断面を形成するまでの破壊に固定した。

ここでは波の持続時間の効果を安定性に対する  $\xi_{1/3}^*$  による影響をも考慮し次のように関数化して表現する。

$$D(\%) = A\sqrt{N[X]} \quad (5)$$

ここでは  $A$  は  $\xi_{1/3}^*$  により変化する常数または関数、 $N$  は作用波数、 $[X]$  は平均 energy sum で図-4 を参考されたい。ここでは  $\xi_{1/3}^*$  による安定性変化の傾向を考慮して次のように定式化していくことにする。

$$A = C_1 \cos\left(\frac{2.0 - \xi_{1/3}^*}{2}\right) \quad (6)$$

ここで  $C_1$  は波の持続時間効果 (柳, 1984) を示す常数である。これらの破壊率変化に対する波特性による持続時間の効果は斜面上の共振現象などによる破壊進行特性を重み付けるもので従来の単純な波数のみによる表現とは異なる。その重み関数の特徴は図-1 のような捨石の破壊進行傾向を考慮したものである。

### 3. 従来の設計式と問題点

従来の代表的な規則波を対象にした設計式は次のような因子を考慮した経験式である。

$$W \geq f_1(H, \theta, \gamma_s, \gamma_w, f) + f_2(T(L), \beta, D, k, \nabla, i, h, r_a, h_c) + f_3(\dots) \quad (7)$$

ここで  $W$  は被覆石の重量であり、 $H$  は設計波高、 $\theta$  は斜面傾斜角、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_w$  は水と石の比重であり、 $f$  は摩擦係数、 $T$  は波の周期、 $\beta$  は波の方向、 $D$  は破壊率、 $k$  は透水係数、 $\nabla$  は石の形状、 $i$  は海底勾配、 $h$  は水深、 $r_a$  は被覆層の

厚さ、 $h_c$  は天端高である。結局、式 (7) の  $f_1$  に関する影響因子がほとんどの設計式に記されているが  $f_2$  と  $f_3$  の因子および  $f_1$  の  $H$  以外の因子は経験常数 ( $\alpha$ ) に含まれて次式のような形になり、設計者および使用式により変動が大きくなっている。

$$W \geq \alpha H^3 \quad (8)$$

この問題は捨石堤は適当に設計してもかまわないという立場にも成るし、それこそ研究して行かなければならない点の多いことが指摘できるものでもある。ここで設計条件を仮定して代表的な規則波に対する設計式によって計算した例を示したものが図-2 と図-3 である。ここで Ryu・Sawaragi (1986) と van der Meer (1988) の式は不規則波に対する設計式であり、他は規則波に対するものである。これらの図で分かるように設計式により捨石重量は2倍以上の差がでてくる。また不規則波になると式 (7) に加えて波の不規則性と関係する外力 parameter が影響して次のような問題が新しく指摘できる。

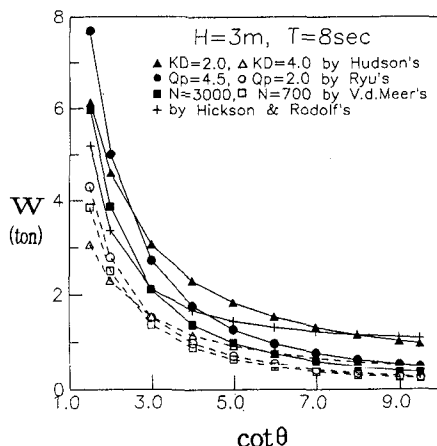
$$W \geq f_{irr}(H_{1/n}, \xi_{1/n}, E_{sum}(j), Q_p, N(t), \dots) \quad (9)$$

従来の代表的な不規則波に対する設計式の一つである Ryu・Sawaragi (1986) の式には式 (9) の内、 $t$  の影響を表していない。断面の形状と破壊率を取り入れて次式に成っている。

$$W_r \geq \left[ \frac{\gamma_w (6.15 Q_p + 20.0) \tan \theta}{\gamma_s^{1/3} (D + 30.1) \tan \phi} \right]^{3/2} H_{1/3}^3 \quad \text{for the uniform slopes} \quad (10)$$

$$W_r \geq \left[ \frac{\gamma_w (5.46 Q_p + 17.73) \tan \theta'}{\gamma_s^{1/3} (D + 36.3) \tan \phi} \right]^{3/2} H_{1/3}^3 \quad \text{for the composite slopes} \quad (11)$$

ここで  $D$  は被覆工の破壊が filter layer まで進行した時を 100 % とした場合の破壊率であり、 $\phi$  は材料の安息角、 $\theta$  は複合断面堤の平坦部の幅  $1_b = 0.2 L_p$  ( $L_p = \text{peak}$



図二 従来の設計式による結果の比較

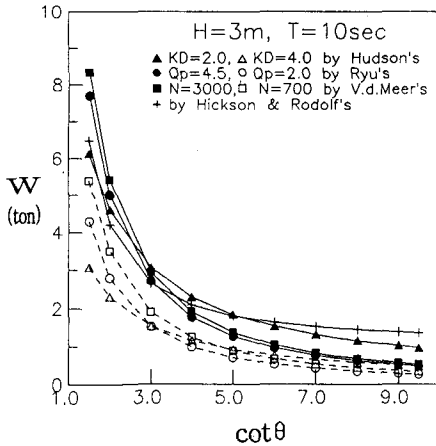


図-3 従来の設計式による結果の比較

周期の波長), 水深  $0.4H_{1/3} < h_B < 0.7H_{1/3}$  の領域にある場合の平衡勾配である。

一方, van der Meer (1986) による安定重量算定式は次のように変換して表される。

$$W_v \geq \frac{\xi_m^{3/2} \gamma_s H_{1/3}^3}{[6.2 P^{0.18} (D_v / \sqrt{N})^{0.2}]^3 (S_r - 1)^3}, \quad \text{for } \xi_m < \xi_c \quad (12)$$

$$W_v \geq \frac{\gamma_s H_{1/3}^3}{[P^{-0.13} (D_v / \sqrt{N})^{0.2} (\cot \theta)^{0.5} \xi_m^3] (S_r - 1)^3}, \quad \text{for } \xi_m > \xi_c \quad (13)$$

ここで式 (12) は plunging 形碎波時, 式 (13) は surging 形碎波時に適用できるもので  $\xi_c$  は次式のように示される碎波指標である。

$$\xi_c = (6.7 P^{0.31} \sqrt{\tan \theta})^{1/P+0.5} \quad (14)$$

また,  $\xi_m$  は平均周期で計算した  $\xi$  であり,  $D_v$  は van der Meer が定義した破壊率で式 (8) の  $D$  とは  $D_v = 0.08D$  の関係を持つ。  $P$  は透水性を示す常数であり,  $N$  は波数で表す持続時間,  $S_r$  は  $\gamma_s/\gamma_w$  であり, 石の比重  $\gamma_s$  と水の比重  $\gamma_w$  の比である。

Ryu・Sawaragi (1986) の結果である式 (10) には波の持続時間効果を導入していないがその結果は波が十分長く作用して平衡断面に達して破壊が進まない状態を対象にした安定式である。また式 (12), (13) には不規則波の波群特性が考慮されていないが  $N$  と  $P$  の効果を入れようとした長所がある。しかし, これらの式で取り入れている  $Q_p$  と  $N$  はいずれも現場では外力要素として整理された例が少ないために現場への適用の時には十分な検討が必要になる。

#### 4. 不規則波に対する安定性評価

上述したような捨石堤設計上の問題点を改善するために Ryu・Sawaragi (1986) が提案している設計式に波の

持続時間の効果を導入して整理しなおした。そのために式 (4) と (5) のような考え方でその影響を考慮するようにした。これは図-1 でも分かるように  $\xi_{*3}$  による破壊の進行特性を表したもので柳 (1984) の規則波による持続時間効果に対する  $\xi$  の影響などの資料から導入したものである。

図-4 と図-5 はそれぞれ前に述べた式 (10) の元になる破壊率の変動と本研究で取り入れた新しい概念による結果を示したものである。すなわち安定性に対する波の持続時間と波群特性を同時に考慮して破壊率の変動特性を整理した図-5 は図-4 に比べて悪くない相関性を持っている。これは式 (4) と (5) の概念を持って波の持続時間効果を表現する事ができることを意味すると言えよう。この実験 data は透水性が  $P=0.4$  (van der Meer, 1988) 程度の構造を対象にしたものであり, 斜面

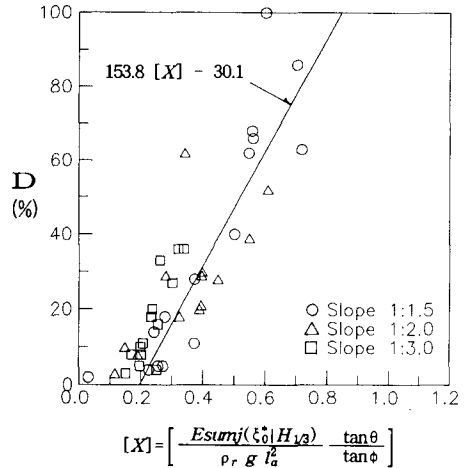


図-4 波群特性による破壊率変化

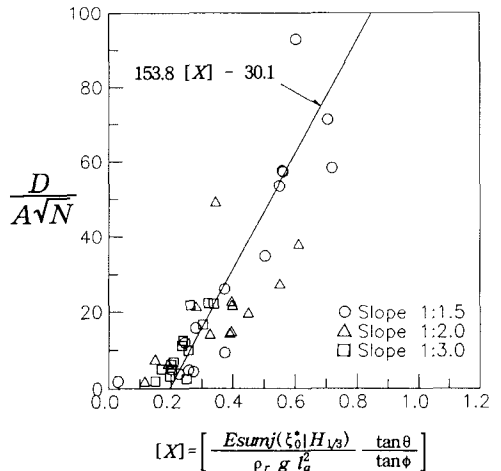


図-5 波の持続時間と波群の影響による破壊率変化

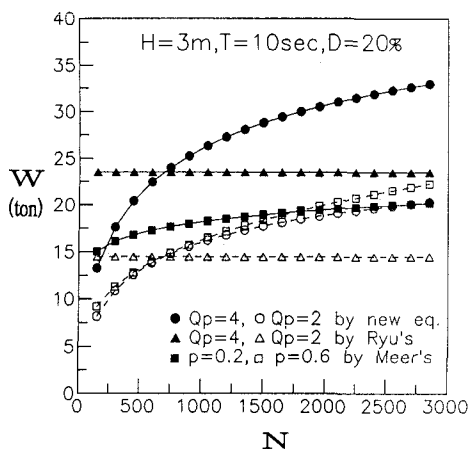


図-6 設計条件別波数による設計捨石重量の変化

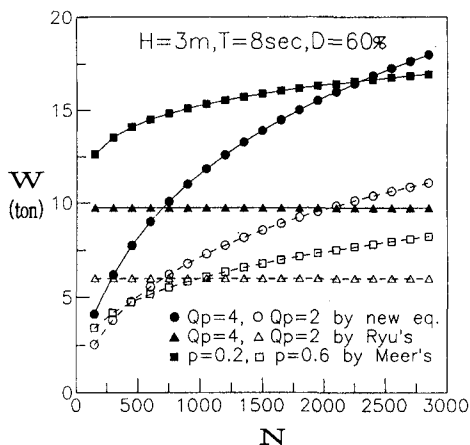


図-7 波の持続時間による設計捨石重量の変化

勾配別に破壊率の変化を示しているが有義な差は見つからない。この関係を持って捨石の重量計算式になおして記したのが式 (15) である。

$$W_{\text{new}} \geq \left[ \frac{\gamma_w (6.15 Q_p + 20.0) \tan \theta}{\gamma_s^{1/3} (D / (A \sqrt{N}) + 30.1) \tan \phi} \right]^{3/2} H_{1/3}^3 \quad \dots (15)$$

式 (15) から計算できる捨石重量の特性を調べるために従来の不規則波に対する計算式と比較したのが図-6である。この図には設計条件より各々の設計式に必要な因子を仮定して計算した結果が示されているが波の持続時間効果による捨石重量の差が見つかり、これは規則波よりも大きな影響であるといえる。

また式 (10) をもって論議した Ryu の結果と比較してみると波の持続時間効果を考慮した安定性評価の重要性が指摘できよう。しかし本研究で得られた式 (15) による結果と式 (12) と式 (13) を用いた結果の間では相当な差が見つかり今後の検討課題であり特に  $Q_p$  の影響が著しく出て来るのがわかる。

図-7 は図-6 と同じ方法で整理した結果であるが設計条件を少し変化させたものである。この図と図-6 とでは違う傾向を示す条件があることから設計条件の差により多少の差をみせることと考えられる。とくに、これらの設計式は敏感な要因を定式化して表現しようとしたものであるから任意の因子の影響でその差が大きくなる条件も有り得る。例えば斜面上の共振条件を導入するかないかにより大きな差がでてくると考えられる。

この変動の重要な原因は堤体の透水性の評価と  $Q_p$  の評価である事が指摘されよう。堤体の透水性が重要である事は著者らおよび他の数多い研究者により指摘されてきたがその影響を定式化した結果はそれほどない。賀来ら (1991) は van der Meer (1988) の実験結果を持って式 (10), (11) とは異なる破壊率算定式を提案している。その式は  $P$  と  $\xi_m$  のみの関数になって簡単ではあるが不規則波の外力因子の影響に対する敏感度などの解析には問題がある。

ここで van der Meer の結果と著者らの結果を取り合わせて安定性評価因子となる  $Q_s$  を定義して整理すると式 (16) と (17) のようになる。

$$Q_s = \frac{\xi_m \cot \alpha}{7.3 C^2 P^{0.36}} - 3.32 \quad \text{for } \xi_m < \xi_c \quad \dots (16)$$

$$Q_s = \frac{P^{0.26}}{0.19 C^2 \xi_m^{0.26}} - 3.32 \quad \text{for } \xi_m > \xi_c \quad \dots (17)$$

この  $Q_s$  は式 (15) の安定性に対する  $Q_p$  の影響を van der Meer 形の  $\xi_m$  と  $P$  により表したものである。ここで  $C$  は常数であり賀来ら (1991) で導入したものと同様のものである。

波の持続時間、波群特性と構造物の透水性による安定性の変化に対しては定式化が可能であったが、天端高の特性、波と構造物と地盤の相互干渉による安定性が評価できるようにしていく必要がある。またこれらの影響を最適化する設計 algorithm を構築していく必要がある。またこれらの過程において設計制約条件は上述したような関数および数値 model などでも構わない。このような捨石堤の安定性はもちろん波浪制御に関する常数、方程式、数学的または数値 model 等その形式と複雑性にかまわず用いられる (Ryu et al, 1992)

## 5. 結 論

以上のように従来の設計式の特徴と問題点から総合的な捨石堤の設計指針を構築する為には捨石堤の安定性に関する詳細な評価と波浪制御機能を取り入れられる設計 system の最適化が必要になる。そのためには安定性および波浪制御に関する影響因子別評価が必要に成る。そこで本研究では安定性に重点をおいた不規則波の影響を定式化して最適設計 system 構築の設計制約条件に応用で

きるようにした。特に、不規則波の持続時間と波群特性による破壊率の変化および捨石重量の変動が求められる新しい不規則波を対象にする設計式を提示した。また安定性に対する透水性の影響をもこの式を用いて評価できるように定式化を試みた。限定された実験資料による定式化であるとは言えるもののその応用範囲は広いと言える。すなわちこの式自体を用いて直接に被覆工の許容重量を計算したり、実験計画に指針を与えたものと言える。またこの data および設計式らはそれらの条件では適用性の優れた結果であるから総合設計 system 構築の為の重要な database に成るものと考えられる。

今後このような database の補強のための幅広い実験と解析手法の開発が必要であり、他の構造諸元の変化による安定性の変化と構造物と地盤との相互作用による安定性の評価などが定式化されなければ成らない。

**謝辞：**本研究は海洋産業開発研究所 (RCOID) の研究

費支援による結果であることを付記して深謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- 賀来衆治・小林信久・柳 青魯 (1991): 不規則波に対する緩傾斜捨石堤の設計式の提案, 海岸工学論文集, 38, pp. 661-665.
- 柳 青魯 (1984): 捨石防波堤の水理学的最適設計に関する基礎的研究, 大阪大学博士論文, 165 p.
- C. E. R. C. (1984): Shore Protection Manual, Vol. II, US Army, CERC, pp. 7. 202-243.
- Ryu, C. R., Y. Kang and J. Kim (1992): Optimal design of rubble mound structures under the irregular wave, Proc. of 23rd ICCE, ASCE, pp. 1503-1516.
- Ryu, C. R. and T. Sawaragi (1986): A new design method of rubble mound structures, Proc. 20th ICCE, ASCE, pp. 2188-2202.
- van der Meer (1988): Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis, Delft Univ of Technology, 152 p.