

不規則波に対する緩傾斜捨石堤の設計式の提案

賀来 衆治*・小林 信久**・柳 青 魯***

1. ま え が き

捨石防波堤の設計に関して、従来から多くの設計式が提案されているが、ほとんどは Hudson の公式の K_D と同様の安定係数を与えたものである。例外は Kobayashi 他 (1990) の数値計算によるモデルである。近年, Van der Meer (1987) によって与えられた新しい捨石の安定性に関する経験式は、彼自身の実験に基づいて求められたものである。本研究は、Van der Meer の経験式に対する Ryu (1986) の不規則波データ、Ahrens (1975) の規則波データ、Van der Meer のデータの適用性を検討し、その限界を明らかにする。さらに、データ解析に基づいてより汎用性のある経験式を導くとともに新しい概念を提案している。

2. 水理実験方法及び諸元

2.1 Van der Meer の不規則波実験

Van der Meer (1988) は、約 300 ケースの実験を不規則波を用いて行った。その実験は次の様に分けられる。
a) 捨石傾斜堤における静的安定性についての小スケール実験。b) 捨石傾斜堤における動的安定性についての小スケール実験。c) 大スケール実験による砂海岸まで遷移した動的安定性とスケール効果、ここでは静的安定性のみに限ることとする。主な実験に用いた代表的断

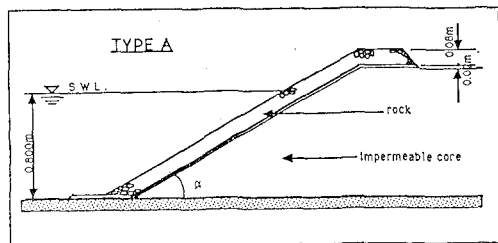


図-1(a) 不透過性の捨石傾斜堤

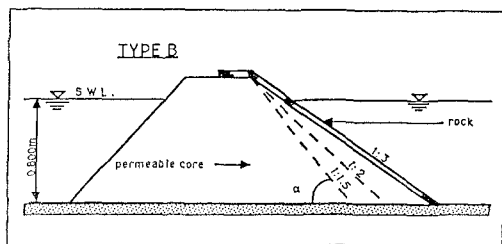


図-1(b) 透過性のある捨石傾斜堤

面を示す。

2.2 Ryu の不規則波実験

Ryu (1986) の実験は透過性の Core 部を含む構成された一様法面勾配の捨石堤を用いている。法面勾配は 3 種類で法先水深 200 m を一定に保つようにした。実験波には、不規則波を用いた。実験は捨石破壊が Core 部に達した時に終了する。捨石堤は再び築造されて実験を行う。尚、破壊までの平均波数は 700 波である。

2.3 Ahrens の規則波実験

Ahrens の実験諸元は、波高、周期、法面勾配、石の重量がパラメーターとして含まれており、波高は 0.43 ~ 1.83 m, 周期は 2.85 ~ 11.3 sec, 法面勾配は 2.5 ~ 5.0 であり、捨石の重量は 120.1 ~ 533.8 N が用いられている。波数は、周期 11.3 sec 時 400 から 2.5 sec 時 1900 と変化する。

実験は捨石の移動がなくなり底面が安定な状態となるまで行なわれる。その結果、Ahrens における Damage-level は 3 種類に分けられる、Zero-damage, Tolerable-damage と Failure-damage である。

2.4 系統的データの整理

Van der Meer と Ryu の実験データより以下のとおり 6 種類の捨石堤に分ける。Type A: 不透過性の捨石傾斜堤 (図-1a), Type B: フィルターのない透過性の捨石傾斜堤 (図-1b), Type C: 一様捨石傾斜堤, Type D: Bタイプで床勾配が 1:30 で洗先水深が 0.40 m である。Type E: Bタイプで床勾配が 1:30 で法先水深 0.20 m である, Type F: Core とフィルターを伴う透過性の捨石傾斜堤であり、床勾配は 1:40 で法先

* 正会員 MCE. (株)建設技術研究所

** 正会員 Ph.D. Professor University of Delaware
Department of Civil Engineering

*** 正会員 工博 釜山水産大学副教授 海洋工学科

水深は 0.20 m である。尚, Type A~E は Van der Meer のデータ, Type F は Ryu のデータである。また Type における LA, LB はそれぞれ大スケール実験の A と B である。各 Type における透過係数 P は表一1 に示すとおりである。一方 damage-level における Van der Meer の S と Ryu の $D(\%)$ は定義的に異なったものであるが, 次の式に示す関係が存在すると考えられる。

$S=0.08D(\%) \dots\dots\dots(1)$

以上のことより, 実験データの諸元を整理すると 表一2 となる。詳しいことは, Kaku (1990) の論文を参照されたい。

表一1 タイプ別 Van der Meer の透過係数 P

Structure Type	P
A	0.1
B, D, E	0.5
C	0.6
F	0.4

表一2 不規則波データ諸元一覧表

	D_{n50}	Δ	$\cot\alpha$	$H_s(m)$	$T_m(sec)$	S
A	0.0360	1.615 ~1.630	2.0 ~6.0	0.0464 ~0.2573	1.31 ~3.26	0.32 ~32.97
B	0.0332	0.092 ~0.0360	1.5 ~3.0	0.0461 ~0.1841	1.24 ~3.00	0.43 ~28.80
C	0.0360	1.615	2.0	0.1009 ~0.1882	1.31 ~2.97	1.09 ~30.08
D	0.0360	1.615	2.0	0.0900 ~0.1555	1.67 ~2.20	0.86 ~20.04
E	0.0360	1.615	2.0	0.1270 ~0.1445	1.70 ~2.18	2.27 ~12.45
F	0.0196	1.660 ~3.0	1.5 ~3.0	0.0285 ~0.0986	0.75 ~1.38	0.16 ~8.00
LA	0.210	1.70	3.0	0.050 ~0.850	4.40	1.97 ~16.35
LB	0.210	1.70	3.0	0.870 ~1.180	4.40	1.82 ~21.08

3. 従来の経験式の評価

前節より整理されたデータを Van der Meer の経験式を用いて, 安定係数 N_s と破壊率 S についてのそれぞれの評価を行う。

3.1 Van der Meer の経験式の評価

Van der Meer の経験式は次のとおり示される。

$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \sqrt{\xi_m} = 6.2 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} : \xi_m < \xi_c$
 $\dots\dots\dots(2)$

$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P : \xi_m > \xi_c$
 $\dots\dots\dots(3)$

$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{2\pi H_s / g T_m^2} \dots\dots\dots(4)$

ここに, H_s は有義波高, T_m は平均周期, Δ は石の比重, D_{n50} 代表粒径, P は透過係数, N は波数, α は底面勾配, ξ_m は砕波帯相似パラメーターであり, 式(2), (3) はそれぞれ巻き波と砕け寄せ波のケースである。区別に使った ξ_c は次の式によって与えられる。

$\xi_c = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/P+0.5} \dots\dots\dots(5)$

安定係数 N_s に関して式(2), (3) を書き直すと,

$N_s = \frac{6.2 P^{0.18} (S/\sqrt{N})^{0.2}}{\sqrt{\xi_m}} : \xi_m < \xi_c \dots\dots\dots(6)$

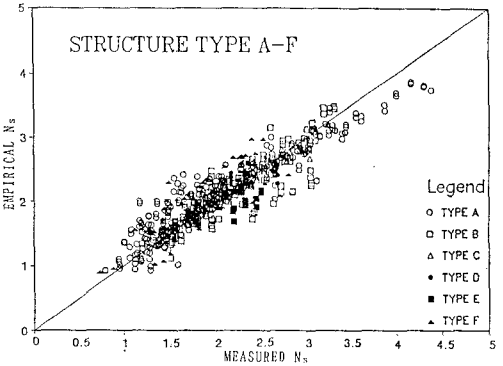
$N_s = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P : \xi_m > \xi_c$
 $\dots\dots\dots(7)$

ここに,

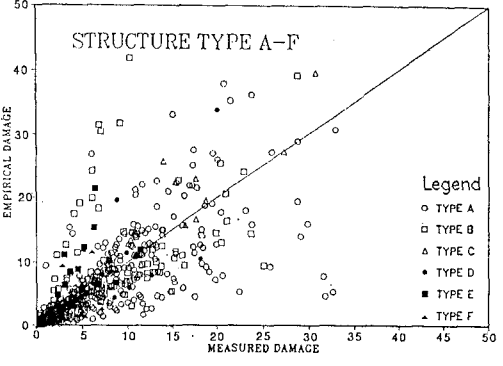
$N_s = H_s / \Delta \cdot D_{n50} \dots\dots\dots(8)$

また破壊率 S について変形すると

$S = \sqrt{N} \left(\frac{N_s \sqrt{\xi_m}}{6.2 P^{0.13}} \right)^5 : \xi_m < \xi_c \dots\dots\dots(9)$



図一2 Van der Meer の経験式による安定係数 N_s の比較



図一3 Van der Meer の経験式による破壊率 S の比較

$$S = \sqrt{N} \left(\frac{N_S P^{0.13}}{\xi_m P \sqrt{\cot \alpha}} \right)^5 : \xi_m > \xi_c \dots\dots\dots (10)$$

以上の式(6)~(8)に表-2のデータを用いて実験値と経験値の N_S の比較, また同様に式(9), (10)より, 破壊値 S の比較を行った. その結果を図-2と図-3に示す. また Ahrens のデータについても同様に N_S について比較した結果を図-4に示す.

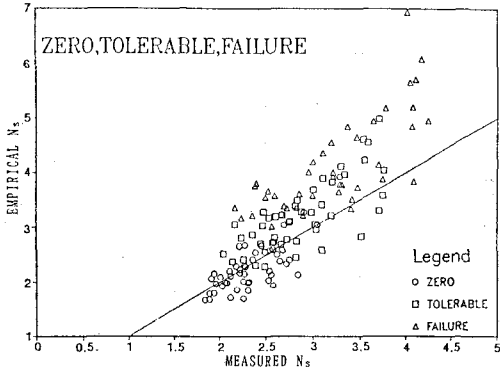


図-4 Van der Meer の経験式による安定係数 N_s の Ahrens の規則波データに対する比較

図-2より Van der Meer の経験式における安定係数 N_s は Ryu の不規則波データで算定しても良い相関関係が得られる. 反面 Ahrens の規則波データ, 特に failure-damage のケースにおいては, N_s の値が実測値より経験式による予測値が大きくなる. 図-3より破壊率 S における Van der Meer の経験式は, 6種類のすべての防波堤形成において実験データとの相互関係が劣ることが示された. よって以下破壊率 S を直接予測する経験式を提案することにする.

4. 新設計式の提案及び評価

4.1 Ryu の経験式の検討

Ryu の経験式における一定勾配の破壊率 D は次の式

で与えられる.

$$D = 153.8 \left\{ \frac{E_{sumj}(\xi_0^* | H_{1/3}) \tan \theta}{\rho_r g l v^2 \tan \phi} \right\} - 30.1 \dots\dots\dots (11)$$

ここで,

$$E_{sumj}(\xi_0^* | H_{1/3}) = \rho_w g H_{1/3}^2 (0.04 Q_P + 0.13) \dots\dots\dots (12)$$

これより, ρ_r は捨石の密度, $\rho_r/\rho_w = (J+1) = 2.66$, $H_{1/3} = H_s$, $\tan \phi = 1.09$, $l_a = D_{n50}$, $\tan \theta = \tan \alpha$ の諸条件を与えることにより式(11)は次の様に簡略化される.

$$D = 146.2 N_S^2 \tan \alpha (0.04 Q_P + 0.13) - 30.1 \dots\dots\dots (13)$$

ここに, N_S は式(8)で与えられる. さらに式(1)の条件と $Q_P = 2.5$ の時, 破壊率 S は次式のように書き変えることができる.

$$S \approx 2.69 N_S^2 \tan \alpha - 2.41 : N_S > N_c \dots\dots\dots (14)$$

$$S = 0 : N_S \leq N_c \dots\dots\dots (15)$$

ここに, Ryu のデータに対しては

$N_c = \sqrt{(2.41/2.69) \cot \alpha}$ である. 式(14), (15)の限界安定係数 N_c (Critical stability number)は, 式(9), (10)において $N_c > 0$ のとき常に $S > 0$ であるのとは異なり捨石の初期移動を知るパラメーターとして新しい経験式に必要であると思われる.

4.2 新しい経験式の提案及び検討

波による洗掘面積 A の時間に伴う増加は次の関係式で表わせられる.

$$\frac{dA}{dt} = C(A_e - A) > 0 \dots\dots\dots (16)$$

ここに, C は定数, A_e は洗掘平衡状態の A である. また, $S = (A/D_{n50}^2)$ より限界平衡状態の破壊率 $S_e = A_e/D_{n50}^2$ とする新しい概念を導入した. よって式(16)は初期条件の $t=0$ の時 $A=0$ を与えることにより次式に書き変えられる.

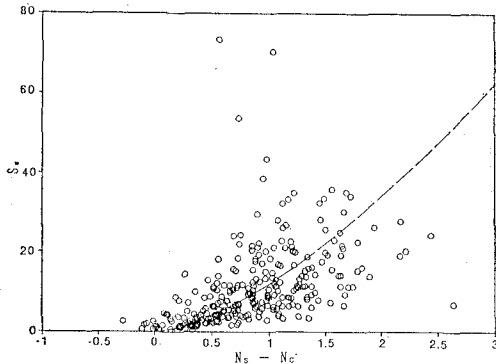


図-5 S_e と $(N_s - N_c)$ の式(18)-(21)による関係図 ($a_5=12$, $b_2=1.3$, $c_2=0.40$)

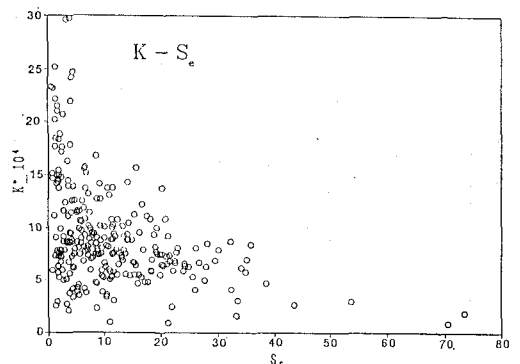


図-6 K と S_e の式(22)による相関関係図 ($a_1=0.01$, $b_1=0.8$, $c_1=7$)

$$S = S_e(1 - e^{-KN}) \leq S_e \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに K は経験定数で, N は波数である.

Van der Meer のデータ値を用いて式 (17) の S_e の経験式を次の様に表わした.

$$S_e = a_2(N_S - N_0)^{b_2} : N_S > N_0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

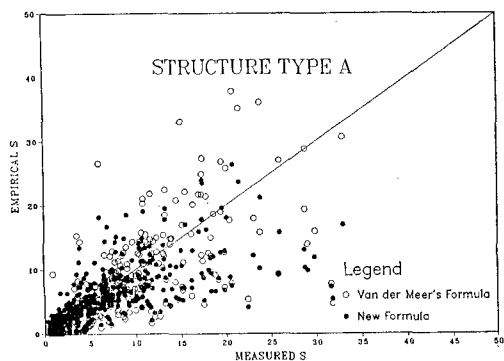
$$S_e = 0 : N_S \leq N_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに a_2, b_2 は係数, N_0 は $\xi_m, P, \cot \alpha$ を関数とする限界安定係数であり, 次の式のように示される.

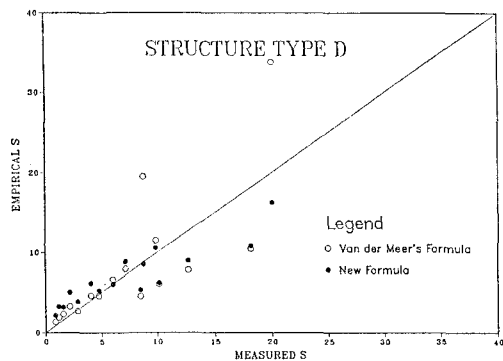
$$N_0 = c_2 \frac{6.2 P^{0.18}}{\sqrt{\xi_m}} : \xi_m < \xi_0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$N_0 = c_2 \xi_m P \frac{\sqrt{\cot \alpha}}{P^{0.13}} : \xi_m > \xi_0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

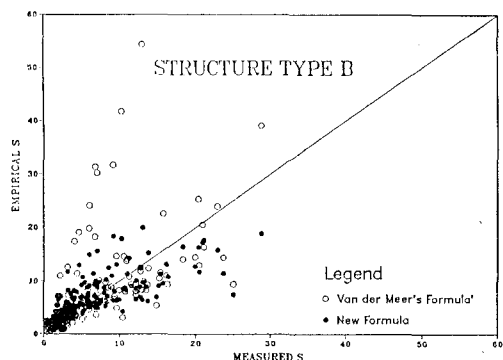
ここに c_2 は経験係数である. 図-5 に示す様に $a_2 \approx 12, b_2 \approx 1.3, c_2 \approx 0.40$ とすると Van der Meer のデータ値の傾向を示すことができる. さらに K は S_e の関数であると仮定した時,



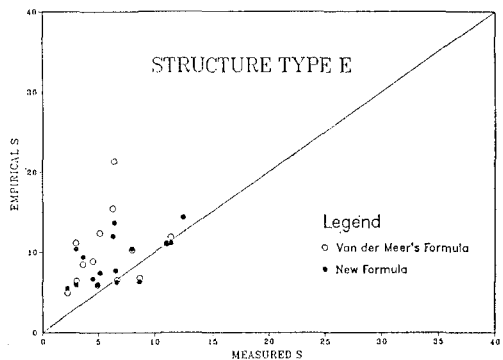
(a)



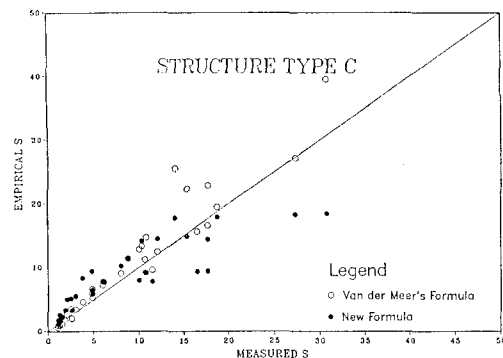
(d)



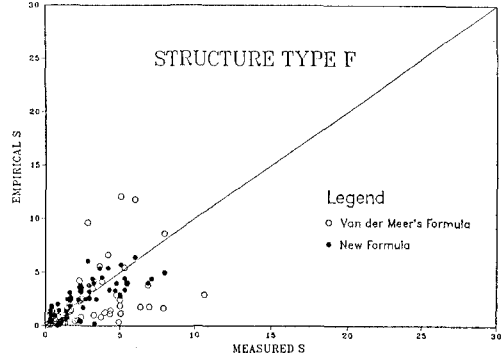
(b)



(e)



(c)



(f)

図-7 新しい経験式と Van der Meer の式の不規則波データによる比較

$$K \approx \frac{a_1}{S_e^{b_1} + c_1} \dots\dots\dots (22)$$

ここに a_1 , b_1 , c_1 は係数であり 図-6 より $a_1 \approx 0.01$, $b_1 \approx 0.8$, $c_1 \approx 7$ と求められる。

故に, 新しい経験式は与えられた P , ξ_m , $\cot \alpha$ と N_s により式 (18)–(22) を用いて S_e 及び K を求め, 波数 N を式 (17) に代入することより破壊率 S は求めることができる。新しい経験式を用いた経験値と実験値の相関関係を, Van der Meer の経験式との比較も含めて図-7 に示す。実験値は表-2 にまとめている。図より全体におけるデータのバラツキは新しい経験式を用いた方が少ないことがわかる。

定量的に比較するため, 実験値と経験値の相関係数 r 及び root-mean-square error (σ_{error}) を, 新しい経験式と Van der Meer の経験式に対して計算した。ここで求められた a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 の係数による新しい経験式は $r \approx 0.69$, $\sigma_{error} \approx 4.6$ であり, 反面 Van der Meer の経験式においては $r \approx 0.70$, $\sigma_{error} \approx 5.3$ である。この結果及び図-7 より, 新しい経験式の方がすぐれていることが示された。

5. あとがき

以上捨石傾斜堤に対する, 不規則波, 規則波による検討を行なって, 不規則波に対する破壊率 S を求める新

しい経験式を提案した。Van der Meer の経験式に比べて新しい経験式はバラツキの少ない有用性のある式であり, Ryu の式に比べても汎用性のあるものとなったが, まだ相関係数の値が優れたものでなく, 今後, 式自体の改良を含めてよりよい実用的な汎用性のある経験式を求めるための努力が必要と考えている。しかしながらここで提案した限界安定係数 N_c と限界平衡状態の破壊率 S_e の概念は今後の緩傾斜捨石堤の設計に役立つものと思われる。

参 考 文 献

- Ahrens, J. P. (1975): Large wave tank of riprap stability. Tech. Memo. No. 5, U. S. Army Coast. Engrg. Res. Ctr., Ft. Belvoir, Va..
- Kaku, S. (1990): Hydraulic Stability of Rock Slopes under Irregular Wave Attack. Thesis submitted to University of Delaware in partial fulfillment for the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering.
- Kobayashi, N., A. Wurjanto and D. T. Cox, (1990): Rock slopes under irregular wave attack, Proc. 22nd Coastal Engrg. Conf., ASCE (in press).
- Ryu, C. R. and T. Sawaragi (1986): A new design method of rubble mound structures. XX Coastal Engrg. Conf. Proc./CER Council, ASCE, Taipei, Taiwan, pp. 2188–2202.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layers—design formulae. Coast. Engrg., 11, pp. 219–239.
- Van der Meer, J. W. (1988): Rock slopes and gravel beaches under wave attack. No. 396, Delft Hydraulics Communication, Delft, The Netherlands.