

# 不規則波による捨石防波堤の破壊特性

榎 木 亨<sup>\*</sup>・ 柳 青 魯<sup>\*\*</sup>・ 楠 見 正 人<sup>\*\*\*</sup>

## 1. ま え が き

現地の波は不規則波であるにもかかわらず、不規則波による捨石防波堤の破壊特性についての研究例は極めて少ない。また、あったとしても、不規則波と規則波との実験結果を対比して、不規則波のうちのいずれの統計量を代表波に選ぶかということを論じることが多い、しかしながら、捨石の崩壊現象が単一波の波力のみならず、前後の波の影響を受けることが近年指適されており<sup>1)</sup>、このような問題に対して、一般的に従来設計で用いられている有義波や 1/10 最大波をもって代表波に選び、捨石堤の安定を論議することについては多くの疑問がある。例えば、同一有義波高を有する不規則波であっても、スペクトル型が変化すれば、それに密接な関係をもつ波の連の特性の変化によって、捨石堤の破壊状況も異なると考えられる。

本研究では、不規則波における従来からの高波の連の概念に加えて、捨石堤の破壊に大きく影響を及ぼす共振現象を左右する surf similarity parameter  $\xi$  ( $=\tan\theta/\sqrt{H/L_0}$ ,  $\theta$ : 法面勾配,  $H$ : 入射波高,  $L_0$ : 沖波波長) が 2.0~3.0 という条件<sup>2)</sup>を満たす波の連の効果について検討し、それぞれの連の連長 ( $j$ ) と連長  $j$  のエネルギー和を示す Run-sum と捨石堤の破壊の関係を明らかにしていこうとするものである。

## 2. 水理実験及び解析方法

### 2.1 不規則波の諸元

実験で使用する不規則波は、木村のインパルス応答関数による方法<sup>3)</sup>を用いてシミュレーションを行い造波せしめた。すなわち、一般の不規則波のスペクトル型はピーク周波数  $f_p$  を用いて次式のように表わすことができる。

$$S(f)=S(f_p)\cdot(f/f_p)^{-m}\cdot\exp[m/n\{1-(f/f_p)^n\}]$$

.....(1)

ここに  $S(f)$  はパワー・スペクトル,  $m, n$  は常数で

ある。

表—1 実験波の条件

| CASE | $f_p$<br>(Hz) | $S(f_p)$<br>$\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ | $m$ | $n$ | remarks                    |
|------|---------------|------------------------------------------|-----|-----|----------------------------|
| W. 1 | 1.0           | 5.0                                      | 5   | 4   | Pierson-Moskowitz spectrum |
| W. 2 | 0.9           | 5.0                                      | 5   | 4   |                            |
| W. 3 | 0.6           | 5.0                                      | 5   | 4   |                            |
| W. 4 | 1.0           | 5.0                                      | 6   | 2   | Neuman spectrum            |
| W. 5 | 0.8           | 5.0                                      | 6   | 2   |                            |
| W. 6 | 0.6           | 5.0                                      | 6   | 2   |                            |
| W. 7 | 0.8           | 5.0                                      | 8   | 4   |                            |

### 2.2 実験方法及び解析方法

実験は入射波の測定と捨石堤の破壊状況が同時に測定できるように、片面ガラス張りの二次元水槽の中央部に隔壁板を設けて二分割し、一方に防波堤モデルを設置した。防波堤モデルは透過性の core 部 (代表径 0.5 cm の砂利)、フィルター層 ( $W_f=10\text{g}$ )、被覆層 ( $W_a=20\text{g}$ , 代表径 1.96 cm) より構成された一様法面勾配の捨石堤である。なお法面勾配は 1:1.5, 1:2.0, 1:3.0 の三種類変化させ、法先水深は 20 cm (一定) に保つようにした。さらに破壊限界を見出すために、表—1 に示す信号をもつ不規則波を徐々にパワーアップして作用せしめた。

### 2.3 破壊率の算定

捨石防波堤の安全性を論議する際に最も問題となるのは、破壊限界及び破壊率の定義である。本研究では被覆材の代表径以上の距離を移動した時、はじめて破壊したもののみなし、rocking 運動をする場合は破壊とはみなしていない。一方破壊率は規則波の場合<sup>1)</sup>と同様に定義し、破壊が core 部にまで進行した場合を破壊率  $D=100\%$  とし、そこまで破壊がいたらない場合は、破壊した部分の捨石の個数と  $D=100\%$  としたときの破壊個数の比でもって表わした。(参考文献 1) 参照) なお従来の破壊率の定義は、任意領域内の移動個数を破壊前のその領域における総個数で除した値であるが、著者らの定義による破壊率と従来の定義による破壊率を対比させたのが表—2 である。なお表—2 中の (1) は任意領域を全斜

<sup>\*</sup> 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

<sup>\*\*</sup> 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

<sup>\*\*\*</sup> 正会員 工修 (株)鴻池組 第2技術部

表-2 破壊率の対比

| 著者らの定義の<br>破壊率 (%) | 従来の定義による破壊率 |         |
|--------------------|-------------|---------|
|                    | (1) (%)     | (2) (%) |
| 100                | 20          | 38      |
| 50                 | 10          | 19      |
| 10                 | 2           | 4       |

面にとった場合、(2) は任意領域を  $SWL \pm H$  に選んだ場合である。

### 3. 波の各種の連の平均連長

#### 3.1 $\xi^*$ の連

海の波の連が海岸構造物の安定性に対して重要であることは、近年多くの研究者によって指適されている。波の連にはいくつかの連が考えられるが、その代表的なのは波高の連であろう。しかしながら著者らは先に捨石の破壊が共振現象に密接な関係があることを明らかにし、共振現象が  $2.0 < \xi < 3.0$  で生じることを発表している。ここでは  $2.0 < \xi < 3.0$  の  $\xi$  を  $\xi^*$  とし、 $\xi^*$  の連について検討しておく。

まず Brunn, Günbak<sup>4)</sup> らは次式のような  $\xi$  の確率分布式を示した。

$$P(\xi) = \frac{8\xi^4}{\xi^5} \exp(1 - 2\xi^4 \cdot \xi^{-4}) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここに } \xi a = \frac{\tan \theta}{\sqrt{(2\pi/g)(H_{1/3}/T^2)}}$$

$\xi^*$  の連の理論解析として、ランダム理論を適用して整理すると、(2) 式より  $\xi$  が  $2.0 \sim 3.0$  に分布する確率は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{\xi^*} &= P(\xi < 3.0) - P(\xi > 2.0) \\ &= \exp\left(-\frac{2}{81}\xi^4\right) - \exp\left(-\frac{1}{8}\xi^4\right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

そして  $\xi^*$  の連の平均連長  $(\bar{j}_{\xi^*})$  は次式となる。

$$\bar{j}_{\xi^*} = \sum_{j_{\xi^*}=0}^{\infty} j_{\xi^*} \cdot P(j_{\xi^*}) = \frac{1}{1 - P_{\xi^*}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $P_{\xi^*}$  は  $2.0 < \xi < 3.0$  の確率である。

図-1 は (4) 式より求まる平均連長の理論値  $\bar{j}_{\xi^*R}$  と実験値  $\bar{j}_{\xi^*E}$  との関係を示したものであるが、この図より上述の理論値は実験値と比較的よく一致していることがわかる。即ち、 $\xi^*$  の連に関しては簡単なランダム理論によって、平均連長をかなり精度よく求めうるといえる。

一方、著者らはこの平均連長  $\bar{j}_{\xi^*}$  とスペクトル尖鋭度パラメーター  $Q_p$  との関係も検討したが、両者の関係には法面勾配の影響が強くあらわれ、 $\xi^*$  の連の平均連長の予測には、上述のランダム理論を用いることが有効であることもわかった。

#### 3.2 設定波高 ( $H_0$ ) の条件つき $\xi^*$ の連

本節では、波高の連及び  $\xi^*$  の連を結合させた、設定

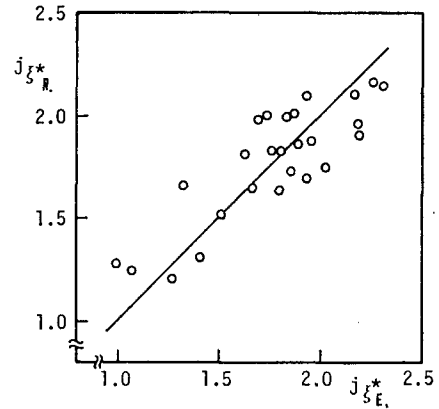


図-1  $\xi^*$  の連の平均連長の理論値と実験値の比較

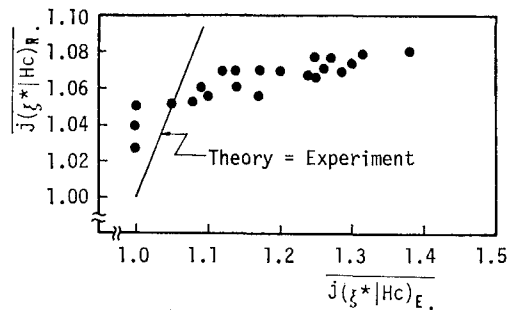


図-2  $H_0$  の条件つき  $\xi^*$  の連の平均連長に対する理論値と実験値の比較

波高  $H_0$  の条件を付けた  $\xi^*$  の連について検討してみる。図-2 はランダム理論を用いて、簡単な計算より求めた  $H_0$  の条件つき  $\xi^*$  の連の平均連長  $\bar{j}(\xi^*|H_0)$  の理論値と実験値とを比較したもので、縦軸に理論値 (添字 R)、横軸に実験値 (添字 E) をとって示してある。この図によると、実験値の方が大きくあらわれているが、これは前後の波の相関のために、波高の連が理論値より実験値の方が大きくあらわれることに基因している。

#### 3.3 $\xi^*$ の連及び $H_0$ の条件つき $\xi^*$ の連

従来の著者らの研究では、 $\xi$  が  $2.0 \sim 3.0$  の範囲では共振現象が発生し易いことから、捨石堤が不安定になると推定してきた。しかしながら法面勾配の影響を受け易く、 $2.0 \sim 3.0$  という領域はいかなる法面勾配に対しても不変なものとはいえない。すでにこれについては、著者らは<sup>5)</sup> 本実験と同一条件で規則波実験を行い、法面勾配  $1:2.20$  の場合の  $2.0 < \xi < 3.0$  でみられる破壊限界は、 $1:1.5$  ではより大きい領域に、 $1:3.0$  の法面勾配に対しては小さい領域に移行することを確認している。

そこで本研究では  $\xi^*$  に代わる、碎波の割合も含む  $\xi^{\#}$  ( $1.5 < \xi/\xi_0 < 2.5$ ) という新しいパラメーターを提案し、 $\xi^{\#}$  の連及び  $H_0$  の条件つき  $\xi^{\#}$  の連について検討した。

ここで  $\xi_0$  とは法面勾配  $\theta$  における Michell の碎波限界に関する surf similarity parameter で次式であらわされる値である。

$$\xi_0 = 2.65 \tan \theta, \text{ for } (H_0/L_0)_{\max} = 0.142 \dots (5)$$

この  $\xi_0^*$  の連の平均連長と  $Q_p$  との関係を求めてみると、法面勾配の影響は殆んどあらわれず、両者の関係には次式で示すような線型関係があることが認められた。

$$\bar{j}_{\xi_0^*} = \frac{11}{12} Q_p + 0.283 \dots (6)$$

また  $H_0$  の条件つき  $\xi_0^*$  の連の平均連長と  $Q_p$  との関係をみてみると、図-3 に示すように、 $\bar{j}_{\xi_0^*}$  と  $Q_p$  の関係と同様の平均連長と  $Q_p$  は法面勾配の影響はあらわれず、線型関係を示すことがわかる。但し図-3 においては  $H_0 = \bar{H}$  において整理した結果である。

以上のことより、不規則波の特性値として、 $\xi_0^*$  はスペクトル形状  $Q_p$  と密接な関係をもつ、非常に有効なパラメーターであるといえよう。

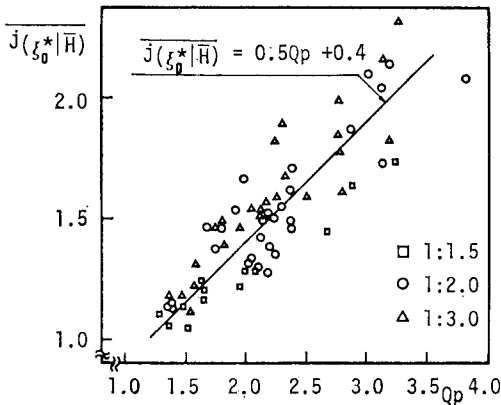


図-3  $H_0 = \bar{H}$  の条件つき  $\xi_0^*$  の連の平均連長と  $Q_p$  との関係

### 3.4 Run-sum と連長の相関関係

前節までは、近年多くの研究者によって注目されている不規則波の連の平均連長についての論議であったが、連長というのは単なる波の数にすぎず、その連を形成する波の強さについて十分な考慮が払われているとはいいたがたい。構造物の安定性については、上述の連長とともに、波力の大きさを示すパラメーターが必要となることは容易に納得できる。そこで本節では、連を形成する波のエネルギー和の連数に対する平均で定義される、Run-sum という特性値をとりあげ、捨石堤の安定性を論議する上の基礎資料として、Run-sum と連長の関係を調べた。

Run-sum の平均値 ( $E_{\text{sum}}$ ) を次式で定義する。

$$E_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \cdot j N_j / \sum_{j=1}^{\infty} N_j \dots (7)$$

ここに  $N_j$  は連長  $j$  の連数を示す。

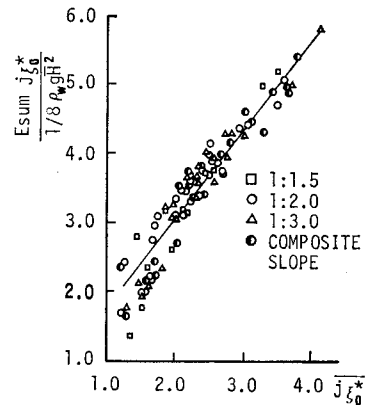


図-4  $\xi_0^*$  の連の平均連長と  $E_{\text{sum}}$  との関係

図-4 は  $E_{\text{sum}}$  の無次元量と  $\xi_0^*$  の連の平均連長との関係を示したものである。この図から明らかなように、平均連長と  $E_{\text{sum}}$  の間には強い相関関係が成立しており、 $E_{\text{sum}}$  も不規則波の連の特性をあらわす有効な値と考えられよう。

## 4. 不規則波による捨石防波堤の破壊特性

### 4.1 規則波と不規則波における破壊特性の比較

まず本実験と同じ条件下で著者らが行った規則波の実験結果と不規則波を用いた実験結果とを比較検討し、規則波の実験結果の不規則波への適用性について検討する。

図-5 は捨石堤の破壊率  $D$  (%) と安定係数  $N_s$  の関係を示した一例で、法面勾配 1:2.0 の場合の結果である。ここに  $N_s$  は、

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H_D}{(\gamma_r / \gamma_w - 1) W_a^{1/3}} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \dots (8)$$

で、 $H_D$  は破壊率  $D$  % の時の波高、 $W_a$  は捨石の重量、 $\gamma_r, \gamma_w$  は捨石及び水の比重、 $K_D$  は Hudson 公式における常数、 $\theta$  は法面勾配の角度である。

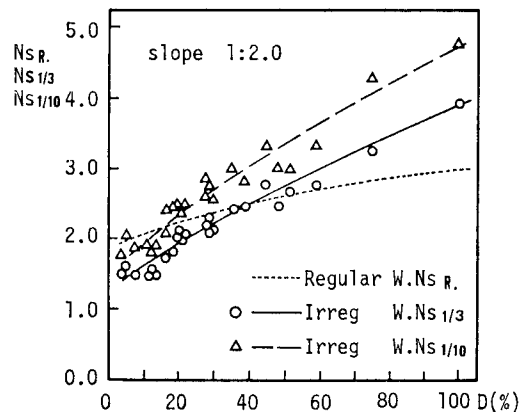


図-5  $N_s$  と破壊率の関係

なお不規則波の値は有義波高及び有義波周期を用いた  $\xi_{1/3}$  及び  $N_{s1/3}$  をもって代表値としているが、1/10 最大波の値  $N_{s1/10}$  を用いた値をも同時に示した。また点線は規則波における各破壊率に対する  $N_s$  の最小値を結んだ結果である。

この図より次のことが結論づけられよう。

不規則波の代表波高として  $H_{1/3}$  (or  $H_{1/10}$ ) を選んだ場合、

- ・  $D < 40\%$  の場合、不規則波の方が不安定、すなわち規則波の結果の適用は危険となる。(15%)
- ・  $D > 40\%$  の場合、不規則波の方が安定となり、規則波の結果の適用は安全側となる。(15%)

初期破壊時においては、不規則波の最大波の影響が安定性に大きいことから、破壊限界を論議するに当って、規則波実験を用いることは妥当ではないといえよう。

さらに、著者らは不規則波による波の時系列から、破壊を生じさせたと思われる波を取り出し、その波の周期の影響についても検討した。その結果、破壊時の波の平均周期は、その不規則波のスペクトルのピーク周波数とほぼ一致することが認められた。この周期の影響について、規則波の場合と不規則波の場合と比較検討するため、不規則波に対しては波高の頻度分布をガウス分布と仮定して、90% 信頼区間の下限値からその時の  $N_s$  を求め、これを  $N_{s(R=90)}$  と表示した。一方不規則波の破壊時の平均周期  $\bar{T}_f$  と同一の周期をもつ規則波の  $N_s$  を  $N_{s(\bar{T}=T_f)}$  として、両者の比を求めたところ、 $N_{s(\bar{T}=T_f)} = (1.2 \sim 1.8) N_{s(R=90)}$  という値がえられた。すなわち不規則波の方の  $N_s$  が規則波の場合の  $N_s$  より小さく、破壊され易いことがわかる。この原因として、不規則波はピーク周波数の波だけでなく、他の周波数成分の波も含くんでいるため、たとえピーク周波数はあまり破壊に影響しない領域であっても、破壊に影響し易い他の周波数領域の波も含くまれているためと考えられる。

## 4.2 波の連と破壊特性

3. で述べた Run-sum と平均連長の関係から考えると、連に関するいづれの定義を用いても同様の傾向を示すことが予想されるが、本節では種々の波の平均 Run-sum と破壊率の変化をもって論議を進めていく。

図-6 は  $\xi^*$  の連及び  $H_0$  の条件つき  $\xi^*$  の連の平均 Run-sum と破壊率  $D\%$  の関係を示したものである。いづれの図においても、 $E_{sum}$  の増加につれて破壊率も増加する傾向が見られるが、設定波高の条件つき  $\xi^*$  の連の方が不規則波の特性とは関係なく整理されるので好ましいといえる。

図-7 は碎波特性も考慮した  $\xi_0^*$  の連の  $E_{sum}$  と破壊率との関係を示したものであり、図-6 と全く同様の結果がえられている。しかしながら図-7 (b) の結果は他の連の結果と比較して、最もデーターのばらつきが小さ

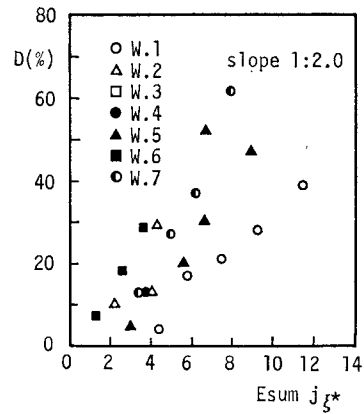


図-6 (a)  $\xi^*$  の連の  $E_{sum}$  と破壊率の関係

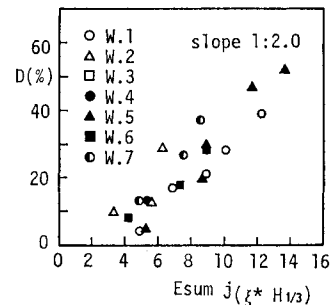


図-6 (b)  $H_0=H_{1/3}$  の条件つき  $\xi^*$  の連の  $E_{sum}$  と破壊率の関係

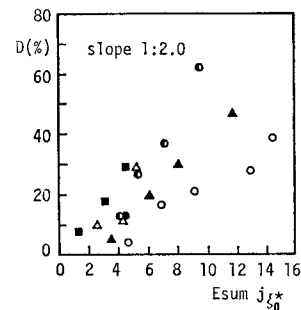


図-7 (a)  $\xi_0^*$  の連の  $E_{sum}$  と破壊率の関係

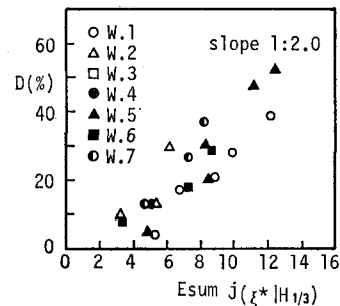


図-7 (b)  $H_0=H_{1/3}$  の条件つき  $\xi_0^*$  の連の  $E_{sum}$  と破壊率の関係

く、今後不規則波に対する捨石堤の安定を論じる場合、この設定波高の条件つき  $\xi^*$  の連の  $E_{sum}$  が有効となるう。

#### 4.3 不規則波による捨石堤の平衡断面の特性

捨石堤の破壊が進行していく時、任意の外力に対応してそれ以上破壊が進行しなくなる断面、すなわち平衡断面を形成することについては、既に規則波実験にもとづいて著者らが指摘している<sup>6)</sup>。

本節では不規則波に対しても、規則波で得られた同じ様な平衡断面が存在するかどうか、また存在するとすればいかなる形状をとるのかを調べた。

不規則波においても規則波でえられた様な、図-8に示す複合断面をもつ平衡断面形状がえられた。この断面形状の特性は中央部の平坦部分の長さであらわすことができるが、規則波の実験結果を参照すると、この平坦部の長さ  $l_B$  は入射波の波長に密接な関係があることが指摘されている。

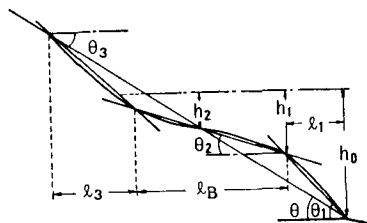


図-8 平衡断面形状

そこで不規則波における結果についても入射波の波長との関係で整理してみたが図-9である。最初に不規則波の波長の代表値として有義波周期を用いた波長  $L_{0.1/3}$  で整理したが、図-9にみられるように同一波形勾配に

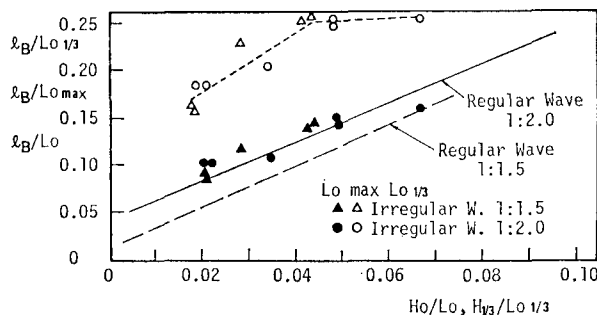


図-9 不規則波における平衡断面の平坦部長さの変動特性

対しては  $l_B / L_{0.1/3}$  が非常に大きな値をとることがわかる。

そこで著者らは波数  $N=500$  に対する最大波波長  $L_{0max}=1.77L_{0.1/3}$  を用いて表示しなおしてみたのが図中の●及び▲の実験結果である。この図から明らかな様に  $l_B / L_{0max}$  と  $H_{1/3} / L_{0.1/3}$  の関係は規則波の実験結果と近づき、不規則波による平衡断面の平坦部の長さは最大波の波長によって左右されることがわかる。

#### 5. あとがき

本研究では不規則波による捨石堤の破壊機構について、不規則波の各種の連の概念を用いて検討をすすめた。

まず波高の連、 $\xi$  の連、さらには砕波条件も考慮した  $\xi^*$  の連などについてその特性を明らかにし、ついでそれらの連のエネルギー和である Run-sum の特性について上述の連の平均連長との相関から論議を行った。そして Run-sum と砕波率との関係を、各種の連に対して行い、最も相関関係が良いのは設定波高の条件つき  $\xi^*$  の連の Run-sum であることを見出した。今後はこの新しい Run-sum という特性値を用いることによって、捨石堤の不規則波に対する設計を考えていかねばならないと考えている。最後に本研究に協力していただいた大阪府の戸田功君に謝意を表するとともに、本研究が文部省科学費(代表 岩田好一郎)の一部であることを付記する次第である。

#### 参考文献

- 1) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德: 捨石防波堤斜面上の共振による破壊機構, 第29回海講, pp. 428~432, 1982.
- 2) 榎木 亨・岩田好一郎・小林 貢: 防波堤斜面における共振現象の発生限界と発生確率, 第28回海講, pp. 352~356, 1981.
- 3) Brunn, P. and A. R. Günbak: Stability of sloping structures in relation to  $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ , Coastal Eng., 1 (4), pp. 287~332, 1978.
- 4) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德: 捨石防波堤の破壊限界に関する一考察, 第37回土木学会年次講演会概要集, (II), 829~830, 1982.
- 5) Sawragi, T., C. Ryu and K. Iwata: Consideration of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to the resonance phenomenon, Proc. of 8th Int. Harbor Congress, pp. 3197~3208, 1983.
- 6) 木村 晃: 不規則波浪のシミュレーションと発生波の特性に関する研究, 京大学位论文, pp. 5~42, 1978.