

# 不規則波実験に必要とされる造波のための 構成波数に関する考察

## ASSESSMENT REFERRING TO THE NUMBER OF WAVES OF IRREGULAR WAVE IN LABORATORY TESTS

大野賢一<sup>1</sup>・松見吉晴<sup>2</sup>・児玉広子<sup>3</sup>・木村 晃<sup>4</sup>

Kenichi OHNO, Yoshiharu MATSUMI, Hiroko KODAMA and Akira KIMURA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 鳥取大学助手 総合メディア基盤センター (〒680-8550 鳥取市湖山町南4丁目101)

<sup>2</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

<sup>3</sup>正会員 大分県庁元職員 (〒870-0021 大分市府内町3-10-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 鳥取大学教授 社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

In this study, to gain an assessment referring to the number of waves of irregular wave used in the laboratory tests, the influence of wave signal length on the damage level of armour layer is investigated by the experiments. Furthermore, the statistical properties of the high wave and its wave grouping relating to the damage of armour layers are investigated by changing the wave signal length.

The appearance probability of high wave exceeding the critical wave height that brings about the damage of armour model has been analyzed using the Rayleigh distribution. It may be found from this analysis and experiments that 600 waves give a tentative criterion for the number of waves of irregular wave train used in the laboratory tests. Furthermore, to explore a better insight into the criteria for the number of waves, statistical evaluations of the run length of the high wave exceeding the critical wave height in every irregular wave train are provided.

**Key Words:** *number of waves of irregular wave train, critical wave height, damage of armour layers*

### 1. はじめに

近年、混成防波堤のケーソンの設計に対して確率論を用いた信頼性設計法を導入するための研究が進み、実用化の段階に至っている。また「港湾施設の技術基準」の改正に伴って、消波ブロックの所要重量設計も含めた港湾構造物全般に対しても、経済性や安定性の向上を目的として信頼性設計の導入が十分にある。そこで、被覆捨石や被覆ブロックの所要重量計算に対して信頼性設計法を導入する場合、設計外力における波浪、潮位、波浪変形に関する統計的な変動性、安定重量評価式に含まれる捨石やブロックの被害の程度と履歴に関する不確定性について、それぞれの確率分布や期待値などに関する確率特性を明らかにしておく必要がある。これらの内、設計

外力の海象条件は、既に多くの研究により明らかにされている。一方、捨石やブロックに関する安定重量評価は、Van der Meerの安定公式<sup>1)</sup>を基本として研究者毎に被災実験データに基づいた経験式が提案されている。しかし、経験式に含まれる係数が普遍的なものとして与えられていないことから、ある特定の経験式により他の研究者の実験データを整理できないことも事実である。このため、被覆材の被害における不確定性に関する普遍的な確率特性が見出されていない。この原因としては、不規則波を用いた被覆材の安定実験に関して、被災レベルの定義は既に明確にされているものの、入射波の不規則波に対する造波信号の長さの基準が定義されておらず、それが実験毎に異なるためと考えられる。すなわち、図-1に示すように作用時間が同じ条件であっても、

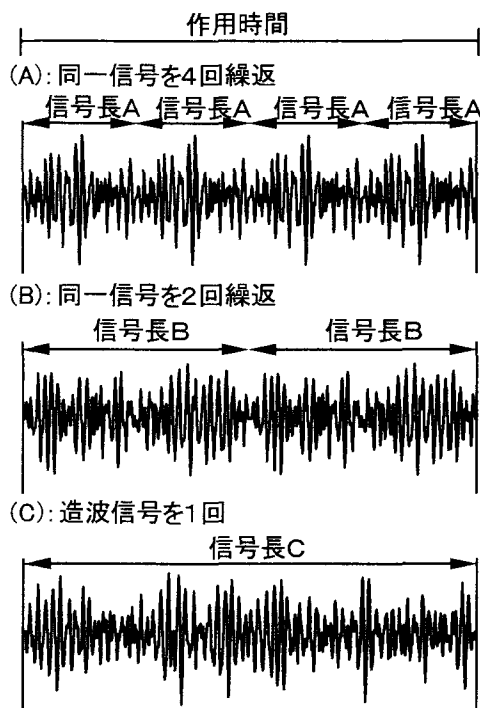


図-1 信号長の説明図

(A) 及び (B) のように短い造波信号を繰り返し作用させる方法と (C) の方法では、ある有義波高及び有義周期に対して同一波浪スペクトルからつくられる造波信号の長さが異なれば、被覆材の被災に関する有義波高以上の高波、特に出現する最大波高の大きさが異なり、実験結果にバラツキが生じる。その結果、研究者毎に安定重量評価式に含まれる係数にバラツキが生じたものと推察できる。

本研究は、不規則波実験における造波不規則波として確率論的な根拠に基づく最小必要波数に関する究明を目的として、まず捨石被覆傾斜堤を対象に、同一波浪スペクトル及び同一造波作用時間における構成波数と被覆捨石の被災量の関係について模型実験より検討し、ついで捨石の移動をもたらず限界波高以上の波高の発生確率に及ぼす構成波数の影響について確率論的に検討するものである。

## 2. 被災実験における造波信号長の影響

### (1) 不規則波造波信号システム

不規則波形シミュレーション結果よりその時系列を造波信号に変換し造波させる場合、各成分波の周期が異なるため計測を目的とする位置での時系列波形はシミュレーション時系列波形と異なる。そこで本研究では、不規則波列の各波の造波板から目的位置までの到達所要時間に着目し、造波開始時刻を成分波毎に調整することで目的位置において目標とする時系列波形を再現することができる。

この不規則波造波信号作成システム<sup>2)</sup>を使用した。この不規則波造波信号作成システムは、数値計算において実験と同様の波列に対して検討が可能となり、例えば、堤体斜面上の波浪流体場において被災を誘発する波を再現できればより効率的に被災実験を行えると共に、多くの被災状況について数値計算から検討することができる。

### (2) 実験方法及び条件

実験は、断面2次元不規則波造波水槽(長さ29m×高さ0.75m×幅0.5m)を用いて行った。岸側には法面勾配1:2の2層被覆捨石で形成される堤体を造波板から19.9mの位置に設置した。被覆材には砂をコーティングさせたガラス玉(直径:2.5cm)を採用し、砕石(平均粒径:2mm)で形成したコア上に2層被覆で千鳥格子に配列させた。

造波条件は水深0.4m一定で、実験で用いるガラス玉の初期移動条件(ダメージ・パラメータ $S=1$ )に相当する不規則波条件(水深0.4m、有義波高8cm、ピーク周期1.6s、周波数スペクトルJONSWAP)について、7種類の造波信号長(512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384 及び 32768)毎に、700波浪ケースについて同一時間(約27分間)作用させた時の水位変動及び捨石の被災個数を計測し、捨石の被災個数のバラツキについて統計的解析を行っている。

### (3) 被覆材の被災に及ぼす構成波数の影響

ここでは、被覆材の被災に及ぼす不規則波の構成波数の影響について被災実験より得られた被災率 $D$ で検討を行った。被災率 $D$ は被災個数を静水面から±有義波高幅の全個数で割った値で定義しており、被災実験の全700波浪ケースに対して被覆材の被災個数を計測し、被災率のバラツキについても解析を行った。

図-2は、被災率 $D$ と構成波数の関係を示したもので、横軸には構成波数 $N$ 、左側縦軸には構成波数毎に100ケースから求めた被災率の平均値、右側縦軸はその標準偏差である。なお、これら $N$ の値は、

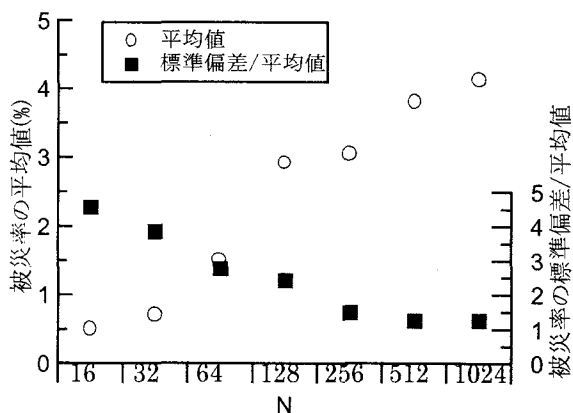


図-2 被災率と構成波数の関係

造波信号長毎の作用時間と平均周期より算出している。この図より、被災率のパラツキ（標準偏差）に造波信号長が強く依存することがわかる。

このパラツキの原因は、造波波列を構成する波数に関係し、構成波数が多いほど被災を誘発する限界波高を越える波高の発生確率が高くなるためである。従って、以下に造波不規則波の構成波数と被災を誘発する限界波高を越える波高の発生確率について検討する。

### 3. 同じ不規則波列を繰り返し造波する場合の限界波高以上の波高の発生確率

#### (1) 捨石の移動をもたらず限界波高

まず捨石の移動をもたらず限界波高  $H_c$  以上の波高の算定は、既に著者らが発表している一様斜面上の捨石の動的挙動シミュレーション手法<sup>3)</sup>と「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」で開発された数値波動水路 CADMAS-SURF<sup>4)</sup>を用いて行った。

計算条件は、数値波動水槽の長さ 21.1m で、法先が造波板から 19.9m の位置に法面勾配 1 : 2 の透過性構造物を設置し、設定水深は 40cm 一定とした。造波境界には実験時に反射波吸収を行っていないことから不透過境界とし、スロープの背後には 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けている。

造波条件は規則波を対象とし、造波時間は 102.4s、入射波周期は 1.0~2.2s までを 0.1s 刻みで 13 ケースとした。被覆捨石の移動をもたらず限界波高  $H_c$  の算出方法は、各周期において入射波高 4.0cm を初期値として 0.2cm 間隔で増加させ、捨石の動的挙動シミュレーションにおいて斜面上で被災（捨石が初期位置より離脱して転落した状態）が発生した時の波高を採用している。

図-3 は、被災発生時の限界波高  $H_c$  と周期の関係を示したものである。この図において、周期が長くなるにつれて入射波高が小さくても被災が発生していることが確認できる。図中、実線で近似曲線を表示しているように、限界波高  $H_c$  に対しては周期特性を考慮する必要があることがわかる。

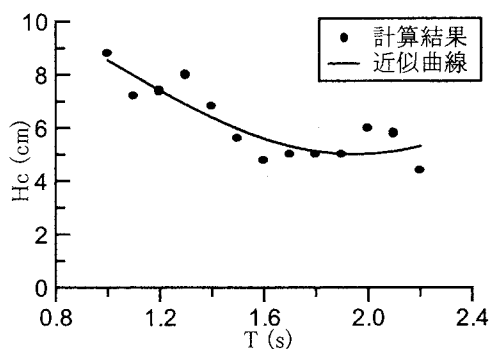


図-3 限界波高と周期の関係

一方、不規則波の波高と周期の結合分布においては、波高が大きくなると周期は  $1.1\bar{T}$  ( $\bar{T}$ : 平均周期) 付近に集中する傾向があることはよく知られている。従って、限界波高に対する周期の効果は認められるが、被覆材の移動を引き起こす限界波高以上の大きな波高に注目すると、周期を固定して議論しても差し支えなかろう。そこで本研究では、周期を固定して、被覆材への作用波高が被覆材の移動をもたらず限界波高以上になると、被災が発生すると仮定する。

#### (2) 限界波高以上の波高の発生確率

波高の確率分布はレーリー分布と仮定し、不規則波実験に用いる波列の構成波数を  $m$  とすると、 $m$  波の集合のうちで来襲する最大波高を  $H_{max}$  とすると  $H_{max}$  の確率分布<sup>5)</sup>は次式で与えられる。

$$p^m(x^*)dx^* = 2a^2x^*\xi \exp(-\xi)dx^* \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \xi &= m \exp[-a^2x^{*2}] \\ x^* &= H^*/H_{1/3} \\ a &= 1.416 \end{aligned}$$

$m$  波の実験を行った場合、 $H_{max}$  が  $H_c$  を越える確率は次式で表される。

$$P(H^* > H_c) = \int_{x_c}^{\infty} p^m(x^*)dx^* \quad (2)$$

ここに、

$$x_c = H_c/H_{1/3}$$

この場合には、確率  $P_{xc}(H_{max} > H_c)$  で被災が発生することになる。 $H_c$  を越える超過確率を図-4 に示すように算定した。横軸は作用させた波の数  $m$  を表し、同図には同一波浪スペクトルに対して本研究で対象としている捨石の初期移動条件（ダメージ・パラメータ  $S=1$ ）に相当する波浪条件（水深 0.4m、有義波高 8 cm、ピーク周期 1.6s、周波数スペクトル JONSWAP）をもつ不規則波について、7 種類の造波信号長毎に 3000 ケースの波形シミュレーションより算定した  $H_c$  を越える波高の発生確率

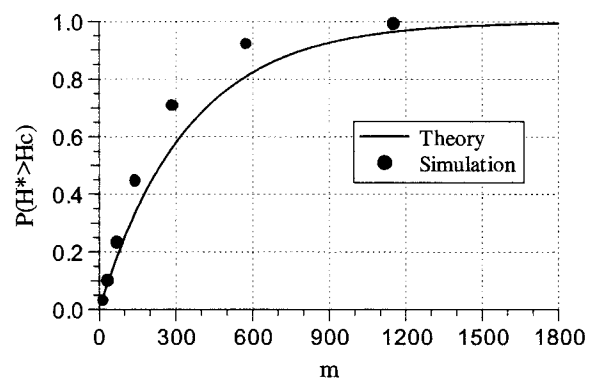


図-4  $H_{max}$  が  $H_c$  を越える発生確率

も併記している。

被覆材の耐波安定性実験においては、図一4より明らかなように不規則波列の構成波数の影響を考慮する必要性がわかる。また、同図に示す波形シミュレーションに基づく結果は解析解にほぼ一致し、本実験に用いた不規則波信号によって捨石の被災量に及ぼす造波信号長の影響が評価できると言えよう。

#### 4. 異なる不規則波列を繰り返し造波する場合の限界波高以上の波高の発生確率

ここでは、構成波数が同じ不規則波列の集合より、異なる不規則波列を組み合わせ、所定の波数になる不規則波列に関して、限界波高以上になる波高の発生特性について統計学的及び確率論的検討を行う。

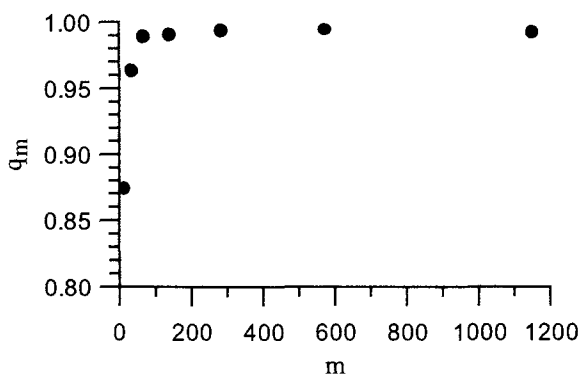
##### (1) 限界波高以上の波高の発生回数

ここでは、構成波数毎に 3000 種類の不規則波列シミュレーションより、目標とする構成波数を約 1100 波（最大信号長の場合）になるように表一1に示すように各造波波数に組み合わせた不規則波列に関して捨石の移動を誘発する限界波高以上の波高の発生回数を統計的に検討した。

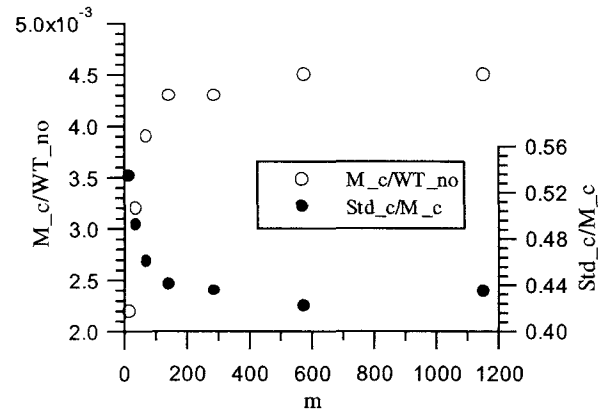
表一1 計算条件

| 信号個数  | 構成波数 | 組合せ数 | 平均波数 |
|-------|------|------|------|
| 512   | 17   | 64   | 1088 |
| 1024  | 35   | 32   | 1120 |
| 2048  | 71   | 16   | 1136 |
| 4096  | 143  | 8    | 1144 |
| 8192  | 287  | 4    | 1148 |
| 16384 | 575  | 2    | 1150 |
| 32768 | 1152 | 1    | 1152 |

図一5は、構成波数毎に 3000 種類の造波信号不規則波列のうちに捨石の移動を誘発する限界波高  $H_c$  を有する不規則波列の割合  $q_m$  (=発生波列の数/3000) を構成波数  $m$  毎に示したものである。この



図一5 限界波高以上の波高を有する不規則波列の割合



図一6 不規則波列における限界波高以上の波高の出現回数

図より、構成波数が 71 以上の波列を組み合わせた場合、約 95%の不規則波列において限界波高以上の波高が出現することがわかる。

図一6は、各組合せ不規則波列における限界波高以上の波高の出現回数について、その平均値 ( $M_c$ ) と標準偏差 ( $Std_c$ ) を示したもので、図中  $WT_{no}$  は、組合せ不規則波列の平均構成波数である。この図より、限界波高以上の波高の出現回数の平均値は、構成波数が 71 以上になると平均構成波数の 0.43% ~ 0.45% とほぼ一定値になるが、その発生回数のバラツキについては、構成波数  $m$  が約 600 波以上で一定となる。

##### (2) 波数毎の造波信号集合から組み合わせた場合の高波の発生確率

###### a) 最大波高の発生確率

いま、 $m$  波からなる不規則波列を考える。それぞれの波高を有義波高で無次元化したもの ( $x_1, x_2, \dots, x_m$ ) 内、第  $i$  番目の  $x_i$  が  $x^*$  より小さくなる確率は次式で与えられる。

$$\int_0^{x^*} p(x) dx = 1 - \varphi(x^*) \quad (3)$$

ここで、波高の確率分布に対してレーリー分布を適用すると、 $p(x)$  及び  $\varphi(x^*)$  は次のように与えられる。

$$p(x) dx = 2a^2 x \exp(-a^2 x^2) dx \quad (4)$$

$$\varphi(x^*) = \exp(-a^2 x^{*2}) \quad (5)$$

いま、 $x_1, x_2, \dots, x_m$  のすべてが  $x^*$  より小さくなる確率は、

$$[1 - \varphi(x^*)]^m \quad (6)$$

で与えられる。従って少なくとも 1 つの波高が  $x^*$  を越える確率は式(6)の余事象となり、

$$1 - [1 - \phi(x^*)]^m \quad (7)$$

となる。  $x_1 \sim x_m$  のうち最大の波高が  $[x^* - (x^* + dx^*)]$  の中に入る確率は、最大の値が  $x^*$  を越える確率から最大の値が  $(x^* + dx^*)$  を越える確率を差し引くことにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \{1 - [1 - \phi(x^*)]^m\} - \{1 - [1 - \phi(x^* + dx^*)]^m\} \\ &= [1 - \phi(x^* + dx^*)]^m - [1 - \phi(x^*)]^m \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、

$$f(x^*) = [1 - \phi(x^*)]^m \quad (9)$$

とおくと、式(8)は次式で表示できる。

$$f(x^* + dx^*) - f(x^*) \quad (10)$$

$f(x^* + dx^*)$  はテーラー展開すると、

$$f(x^* + dx^*) = f(x^*) + \frac{\partial f}{\partial x^*} dx^* + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^{*2}} d^2 x^* + \dots \quad (11)$$

式(10)は  $dx^*$  が十分に小さい場合、次式で表示できる。

$$f(x^* + dx^*) - f(x^*) = \frac{\partial f}{\partial x^*} dx^* \quad (12)$$

ここで、式(9)より

$$\frac{\partial f}{\partial x^*} dx^* = -m [1 - \phi(x^*)]^{m-1} \frac{\partial \phi}{\partial x^*} dx^* \quad (13)$$

となる。また式(5)より

$$\frac{\partial \phi}{\partial x^*} dx^* = -2a^2 x^* \exp(-a^2 x^{*2}) dx^* \quad (14)$$

となり、最終的に、波高の最大値の確率分布  $P_{\max}(x^*) dx^*$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_{\max}(x^*) dx^* &= m [1 - \phi(x^*)]^{m-1} \\ &\quad \times 2a^2 x^* \exp(-a^2 x^{*2}) dx^* \end{aligned} \quad (15)$$

#### b) 限界波高以上の波高の発生確率

次に、 $m$  波から構成された不規則波列の集合要素として  $M$  個ある場合について考える。各要素の最大波高を有義波高で無次元化したものを  $h_1, h_2, \dots, h_M$  とする。各々の生起確率は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P \max(h_i) dh &= m [1 - \phi(h_i)]^{m-1} \\ &\quad \times 2a^2 h_i \exp(-a^2 h_i^2) dh \end{aligned} \quad (16)$$

$h_1, h_2, \dots, h_M$  のうちすべての  $h_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) が  $h^*$  より小さくなる確率は

$$[1 - \phi(h^*)]^M \quad (17)$$

で与えられる。ここに、

$$\phi(h^*) = \int_0^{h^*} P \max(h) dh \quad (18)$$

である。

一方、 $h_1, h_2, \dots, h_M$  のうち少なくとも1つの最大波高  $h$  が  $h^*$  を越えるのは、式(17)の余事象であることより、

$$1 - [1 - \phi(h^*)]^M \quad (19)$$

で与えられる。従って、 $h_1, h_2, \dots, h_M$  のうちの最大の波高が  $[h^* - (h^* + dh^*)]$  の中に入る確率は、最大の波高が  $h^*$  を越える確率から最大の波高が  $(h^* + dh^*)$  を越える確率を差し引けば求まる。すなわち、

$$\begin{aligned} & \{1 - [1 - \phi(h^*)]^M\} - \{1 - [1 - \phi(h^* + dh^*)]^M\} \\ &= [1 - \phi(h^* + dh^*)]^M - [1 - \phi(h^*)]^M \end{aligned} \quad (20)$$

式(9)～(14)と同様に

$$g(h^*) = [1 - \phi(h^*)]^M \quad (21)$$

とおくと、式(20)は  $dh^*$  が十分に小さい場合、次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} & [1 - \phi(h^* + dh^*)]^M - [1 - \phi(h^*)]^M \\ &= M [1 - \phi(h^*)]^{M-1} \frac{\partial \phi}{\partial h^*} dh^* \end{aligned} \quad (22)$$

ここに、

$$\frac{\partial \phi}{\partial h^*} = \frac{\partial}{\partial h^*} \int_0^{h^*} P \max(h) dh = P \max(h^*) \quad (23)$$

である。式(12)と(18)より

$$\phi(h^*) = \int_0^{h^*} \frac{\partial f}{\partial h} dh = f(h^*) \quad (24)$$

となる。従って、 $m$  波から構成された  $M$  個の不規則波列の集合の中で最大の波高が  $h^*$  となる確率は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_M(h^*) dh^* &= M \left\{1 - [1 - \phi(h^*)]^m\right\}^{M-1} \\ &\quad \times P \max(h^*) dh^* \end{aligned} \quad (25)$$

構成波数  $m$  個の不規則波列の母集団から  $M$  個の不規則波列を用いた不規則波の波高が捨石の移動を誘発する限界波高  $H_c$  を越える確率は次式で表される。

$$P_{Mm}(h^* \geq h_c) = \int_{h_c}^{\infty} P_M(h^*) dh^* \quad (26)$$

ここに、

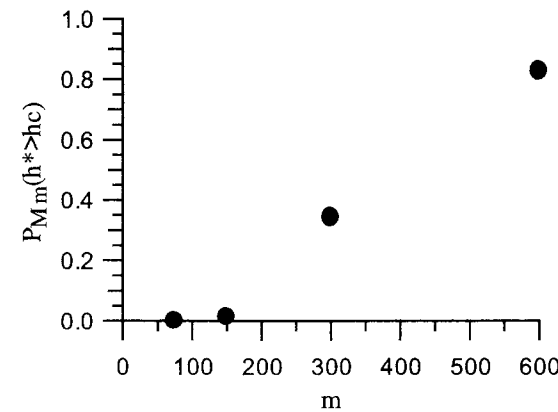
$$h_c = H_c / H_{1/3}$$

である。

本研究では、表－2に示す計算条件のもとに波数  $m$  個の不規則波列を  $M$  個組合せたときの限界波高を越える発生確率を計算することにする。図－7は、組合せ波数を 600 波にした場合の各構成波数毎における限界波高を越える波高の発生確率である。 $m=75, 150, 300$  の場合は、組み合わせることにより発生確率が低下している。

表－2 限界波高以上の発生確率の計算条件

| 構成波数<br>$m$ | 組合せ数<br>$M$ |
|-------------|-------------|
| 75          | 8           |
| 150         | 4           |
| 300         | 2           |
| 600         | 1           |



図－7 限界波高を越える波高の発生確率  
(組合せ波数：600 波の場合)

## 5. まとめ

本研究は被覆捨石の安定性実験における不規則

波の造波信号データ長が波浪場及び被災率等に及ぼす影響について、数値計算及び水理模型実験より検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 数値波動水槽を用いた捨石の動的挙動シミュレーションより、周期特性を考慮した捨石の移動をもたらす限界波高の算定を行い、その限界波高以上の波高の発生確率について検討した結果、被災実験を行う際には不規則波の構成波数を考慮する必要がある。
- (2) 波高及び被災率に及ぼす造波信号長の影響に関する実験より、短い造波信号を繰り返す方法では被災率の結果に大きなバラツキが生じる。
- (3) 構成波数が同じ不規則波列の母集団より、異なる不規則波列を組合せた不規則波列より、限界波高以上の波高の出現平均回数が構成波数が 71 以上になるとほぼ一定値になるが、その発生回数のバラツキについては、構成波数が約 600 波以上で一定となる。
- (4) 同じ波数からなる不規則波列を組合せた不規則波を対象に、限界波高以上になる波高の発生確率に関する理論展開を行った。

## 参考文献

- 1) Van der Meer, J.W.: Stability of breakwater armour-layers design formulae, *Coastal Eng.*, Vol. 11, pp. 219-239, 1987.
- 2) 大野賢一・松見吉晴・児玉広子・木村 晃：被覆材の耐波安定性に関する不規則波実験における造波信号長の影響，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 746-750. 2002.
- 3) 大野賢一・松見吉晴・木村 晃：被覆捨石の動的挙動を考慮した多方向不規則波浪場における堤頭部の安定性について，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 891-895, 2000.
- 4) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術研究センター，296p, 2001.
- 5) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp. 112-114, p176, 1991.