

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

大野 賢一*・松見 吉晴**・児玉 広子***・木村 晃****

不規則波を用いた被覆材の安定実験では被災レベルの定義が明確にされているものの、実験波に対する造波信号長の基準が明確に定義されていない。そこで本研究は、被覆材の耐波安定実験における不規則波の造波信号長の影響を明らかにするため、まず数値波動水路を用いた捨石の動的挙動シミュレーションによる捨石の被災限界波高の算定結果をもとに限界波高以上の波高の発生確率と波数の関係を示し、ついで模型実験より被覆材の被災率のパラツキが造波信号長の増長に伴って減少すること、さらに被覆材の被災メカニズムから被災時の波と直前の波の碎波相似パラメータが2~3に集中することを示したものである。

1. ま え が き

被覆材の所要重量評価に信頼性設計法を導入する場合、設計外力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に関する不確定性について確率分布や期待値などの確率特性を明らかにしておく必要がある。捨石や被覆ブロックに関する安定重量評価は、Van der Meer の安定公式 (1987) を基本として研究者毎に被災実験に基づいた経験式が提案されているが、ある特定の経験式により他の研究者の実験データが整理できないことも事実である。すなわち、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ため、被覆材の被災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、被覆材の被災実験に関して被災レベルの定義は被災率 ($D = n/N \times 100$: n は被災個数, N は被覆材の総数) やダメージ・パラメータ ($S = A/D_{n50}^2$: A は侵食面積, D_{n50} は被覆材の代表径) 等により既に確立されているが、実験に用いる不規則波に対する信号長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。例えば、図-1 に示すように波作用時間が同じ条件であっても、(A) 及び (B) のように短い造波信号長を繰り返して作用させる方法と (C) の方法では、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、被覆材の被災に係る有義波高以上の高波の出現確率が異なり、その結果、被災結果にパラツキが生じるものと推定される。

そこで本研究は、被覆材の安定実験における不規則造波信号の必要最小基準長の究明を目的として、まず被覆捨石傾斜堤を対象に不規則波の造波信号長の変化に伴う捨石の移動をもたらす限界波高以上の波高の発生確率について検討し、ついで同一波浪スペクトル及び同一造波

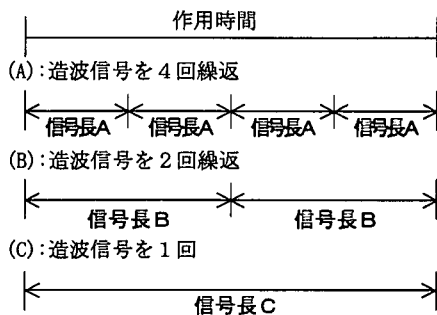


図-1 造波信号長の説明図

作用時間における造波信号長と被覆捨石の被災量の変化特性について、波高の発生確率分布の検証も含めて水理模型実験及び数値計算より検討したものである。

2. 被覆捨石の安定性に関する数値計算による検討

(1) 捨石の安定性シミュレーション方法

堤体斜面上の波浪流体場を計算するために、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)で開発された数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いた。この数値波動水路では、基礎方程式として2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及び Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式、自由表面解析モデルとして VOF 法、乱流モデルには高 Re 型 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルを採用している。本研究では、造波境界にピストンタイプを使用して堤体斜面上における水位変動及び流速変動の時系列データについて数値計算を行った。

堤体斜面上の被覆材の動的挙動計算モデルについては、大野ら (2000) が提案している一様斜面上における被覆捨石の動的挙動に関する計算モデルを改良し用いた。すなわち、従来の著者らの動的挙動モデルは作用流速として水平方向の流速成分しか考慮されていなかったが、今回採用した数値波動水路では鉛直方向の流速成分が算出されることから、揚力 F_L に対して以下に示す鉛

* 正 会 員 博(工) 鳥取大学助手 総合情報処理センター

** 正 会 員 工 博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

*** 学生会員 鳥取大学大学院工学研究科社会開発システム工学専攻

**** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

直方向流速を考慮した修正を行った。

$$F_L = \frac{1}{8} \rho C_L \varepsilon \pi d^2 u^2 + \frac{1}{4} \rho m' \varepsilon_w \pi d^2 w^2$$

$$\begin{cases} w \geq 0: \varepsilon_w = 0 \\ w < 0: \varepsilon_w = -1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 C_L は揚力係数、 m' は抗力係数、 d は捨石の直径、 u 及び w はそれぞれ水平及び鉛直方向の流速成分、 ε は水平方向の遮蔽係数、 ε_w は鉛直方向の遮蔽係数であり鉛直流速 w が下向きの場合に作用すること、を表している。ここでは捨石の直径 d を以下の水理実験と同じ 2.5 cm とし、式中の諸定数には $m' = 1$ 、 $\varepsilon = 0.3$ 、 $C_L = 0.5$ を採用している。

計算条件は数値波動水槽の長さを 21.1 m とし、造波板から 19.9 m の位置に法面勾配 1:2 の透過性構造物を設置した。設定水深は 0.4 m 一定である。造波境界は不透過境界とし、構造物背面には 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けている。波浪条件は規則波を対象とし、造波時間は 102.4 s、入射波周期は 1.0~2.2 s までを 0.1 s 刻みで計 13 ケース変化させた。捨石の移動をもたす限界波高 H_c の算出方法は、各周期において入射波高 4.0 cm を初期値として 0.2 cm 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た。

(2) 限界波高以上の波高の発生確率について

図-2 は被災発生時の限界波高 H_c と周期 T 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。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、捨石の動的挙動シミュレーションより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

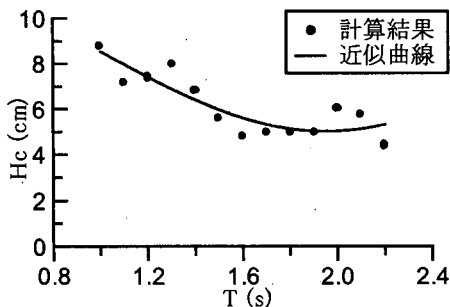


図-2 被災発生時の限界波高と周期の関係

と、周期を固定して議論しても差し支えなからう。なお本研究では、作用波高が被覆材の移動をもたす限界波高以上になると、被災が発生すると仮定している。

波高の確率分布はレーリー分布で近似でき、十分多くの波が来襲する場合は限界波高を超える波高 H^* をもつ波も数多く来襲し必ず被災は発生する。しかし、来襲する波の数が少ない場合、 $H^* > H_c$ の波が来襲しない場合がある。ここで、不規則波実験に用いる波の数を m とし、 m 波の集合のうちで来襲する最大波高を $H_{\max}$ とすると $H_{\max}$ の確率分布は次式で与えられる（合田，1990）。

$$p^m(x_{\max}) dx_{\max} = 2a^2 x_{\max} \xi \exp(-\xi) dx_{\max} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$\xi = m \exp[-a^2 x_{\max}^2]$$

$$x_{\max} = H_{\max} / H_{1/3}$$

$$a = 1.416$$

m 波の実験を行った場合、 $H_{\max}$ が H_c を超える確率 P_{xc} は次式で表される。

$$P_{xc} = \int_{x_c}^{\infty} p^m(x_{\max}) dx_{\max} \quad \dots\dots\dots (3)$$

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

式（3）を被災にあてはめる場合、確率 P_{xc} 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-3 に示す。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 $S=1$ ）に相当する不規則波（水深 0.4 m、有義波高 8 cm、ピーク周期 1.6 s、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 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も併記している。

被覆材の耐波安定性実験においては、図-3 より明らかなように不規則波の構成波数（造波信号長）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。

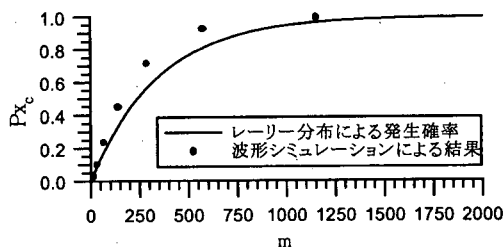


図-3 限界波高を超える波高の発生確率分布

3. 被覆捨石の安定性に関する水理模型実験による検討

(1) 不規則造波信号システムの作成

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の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ための不規則波造波信号作成システムを開発した。この結果、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。

まず波形シミュレーションよりゼロダウン法を用いて目的位置での来襲波列順の波高、周期を判別する。波別の造波板から目的位置までの到達時間は、波速 C 及び造波板と計測点間の距離 l より l/C で与えられる。次に、波別の到着時間は第1波目の到着時間 R_1 を $R_1=0$ とすると、第2波目の時間 R_2 は $R_2=T_1$ となり、 N 番目の到着時間 R_N は次式で表される。

$$R_N = \sum_{i=1}^{N-1} T_i \dots\dots\dots (4)$$

以上のことから、第1波目の造波から第 N 波目の造波までの造波時間間隔 ϵ_N は次式で与えられる。

$$\epsilon_N = R_N + l/C_1 - l/C_N \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $\epsilon_1=0$ 。

波列の最初の方で周期の短い波の場合、 $\epsilon_i < 0$ となることから、最小造波時間間隔を $\epsilon_{\min}$ と表すと、各波の造波開始時刻は $\epsilon_i - \epsilon_{\min}$ ($i=1, \dots, N$)となる。最終的に、目的位置において目標とする N 波から構成される波列を再現するための造波板の変位デジタル信号 Y は、ピストン型の造波機の造波特性を考慮して以下の式で表すことができる。

$$Y(I) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=I_{sj}}^{I_{ej}} r_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_j} i \times \Delta t\right) \\ (I=0, 1, 2, \dots, I_{sj}, \dots, I_{emax}) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$r_j = \frac{H_j}{2} \frac{2k_j h + \sinh 2k_j h}{4 \sinh^2 2k_j h} \\ I_{sj} = (\epsilon_j - \epsilon_{\min}) / \Delta t, \quad I_{ej} = I_{sj} + T_j / \Delta t$$

I_{emax} は $(\epsilon_i - \epsilon_{\min} + T_i) / \Delta t$ の最大値、 H_j 、 T_j 、 k_j 及び r_j は j 番目の波の波高、周期、波数及び造波板の変位振幅、

h は水深、 Δt は造波デジタル信号の時間間隔 (0.05 s) である。造波信号長は信号個数 32768 (造波時間：約 27 分間、波数：約 1200 波) を基準とし、他の信号長の場合は同じ時系列波形を繰り返し造波する方式を採用した。

本不規則造波信号作成システムの検証実験は長さ 29 m の断面 2 次元不規則波造波水槽を使用し、岸側には厚さ 20 mm のステラシートによる消波工 (法面勾配 1 : 2) を斜面法先が造波板から 19.9 m の位置に設置した。造波条件は水深 0.4 m 一定とし、有義波高は 4 cm と 8 cm の 2 種類、ピーク周期は 1.6 s、周波数スペクトルは JONSWAP で、上記 7 種類の造波信号長毎に 2 波浪ケースについて、反射波吸収制御で造波させた。

図-4 は有義波高 8 cm、造波信号長 8192 の時系列波形と周波数スペクトルに関して実験結果と目標波浪の計算結果を比較したものである。まず上図の時系列波形については一部に再現性に弱いところもあるが、全時系列長について比較するとある程度一致しているものと思われる。下図の周波数スペクトルについて、実験結果はピーク値が低下しているものの、目標スペクトルをほぼ再現している。なお、造波信号長が 512、1024 と短い場合、目標スペクトルの再現性に問題を残すことがわかった。

(2) 被災実験における造波信号長の影響

被覆捨石の被災実験は、不規則波造波信号作成システムを用いて上記の水槽で行った。被覆捨石モデルには、表面を砂でコーティングしたガラス玉 (直径：2.5 cm)

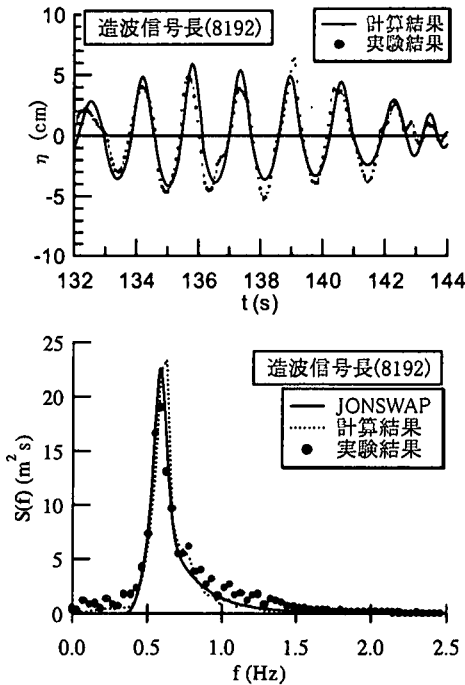


図-4 時系列波形と周波数スペクトル

を用いて、斜面勾配 1:2 の碎石(平均粒径: 2 mm)で形成したコア上に 2 層被覆で千鳥格子に配列させた。なお、捨石モデルには表面粗度として粗い砂 (f_1) と細かい砂 (f_2) を用いて捨石モデル間のかみ合わせが異なる 2 種類を採用した。堤体斜面の法先は造波板から 19.9 m の位置に設置した。造波条件は水深 0.4 m 一定とし、上記 7 種類の造波信号長毎に 30 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。また、本実験では捨石モデルの被災現象を VTR で同時に撮影を行った。

まず発生波高に及ぼす造波信号長の影響について、堤体法先位置での水位変動の計測結果からゼロダウン法により検討した。図-5 は最大波高 H_{max} 及び有義波高 $H_{1/3}$ と造波信号長の関係を示したもので、横軸は造波信号長で左側縦軸が造波信号長毎に 30 波浪ケースから求めた最大波高及び有義波高の平均値 Ave、右側縦軸はそれらの標準偏差 Std である。この図より、各信号長における最大波高の平均値は造波信号長の増長に伴って増大し、その標準偏差は減少する傾向にある。すなわち、造波信号長が長くなれば、波浪ケース毎に発生する最大波高にバラツキが少なくなる。このことから被覆材の被災実験を行う場合、短い造波信号を繰り返す方法では被災率の実験結果にバラツキが生じるものと推察できる。

図-6 は、2 層被覆ガラス玉の被災率と造波信号長の関係を示したもので、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いる。この図より、被覆ガラス玉のかみ合わせ効果 (f_1 及び f_2) の違いに関係なく被災率のバラツキに造波信号長が強く依存することがわかる。特に造波信号長が短い場合、被災率の大きなバラツキ(図中●及び●印)は図-3 に示す限界波高 H_c を越える波高の発生確率が小さいことによるもので、すなわち図-5 に示す造波信号長が短い場合に最大波高に大きなバラツキがあるためである。

以上のことより、被覆材の耐波安定性に関する不規則波実験においては造波信号長の影響を考慮する必要があると確認できる。また、造波信号長に関する最小基準長としては、本実験結果の図-6 より信号長 16384 (約 600 波) 以上で被災率の標準偏差が一定になり、また図-3 より限界波高を越える波の発生確率が約 85% となることから 16384 (約 600 波) が 1 つの目安となりうるが、さらに実験ケース数を増やして検討する予定である。

4. 被災発生メカニズムに関する検討

(1) 数値計算による考察

図-7 は、CADMAS-SURF を用いた捨石モデルの 2 次元動的挙動シミュレーションより被災発生時における

流速の時系列データと被災状況を示したものである。同図上図は、数値波動水槽より得られた水平方向 u 及び鉛直方向 w の流速の時系列データ(入射波高 5 cm, 周期 2.2 s)である。下図は捨石の動的挙動シミュレーションによるローリング状況 (A) 及び被災状況 (B) を示している。(A) の捨石が移動して初期状態に戻る間での時間は上図の 47.0~47.2 s の間 ($\Delta t=0.05$) で、(B) の初期状態から被災に至るまでの時間は上図の 49.2~49.4 s の間に相当する。(B) の場合、捨石は斜面下方向へ大

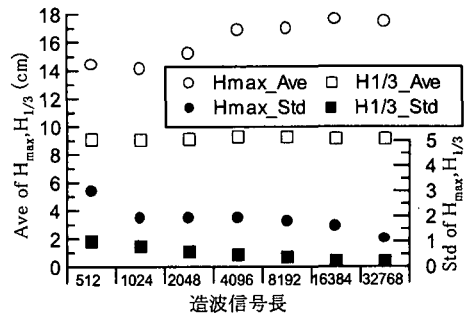


図-5 最大波高及び有義波高と造波信号長の関係

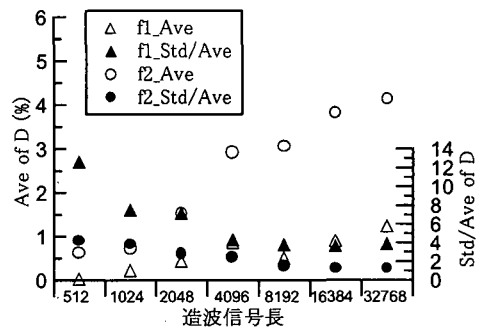


図-6 被災率と造波信号長の関係

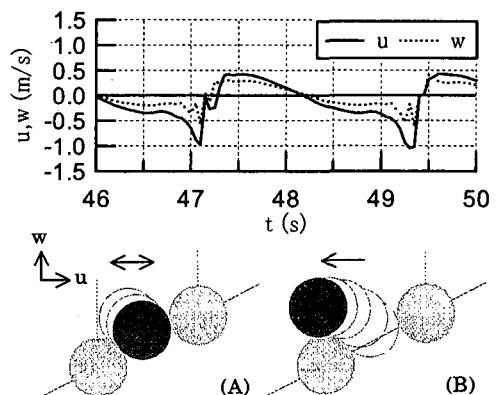
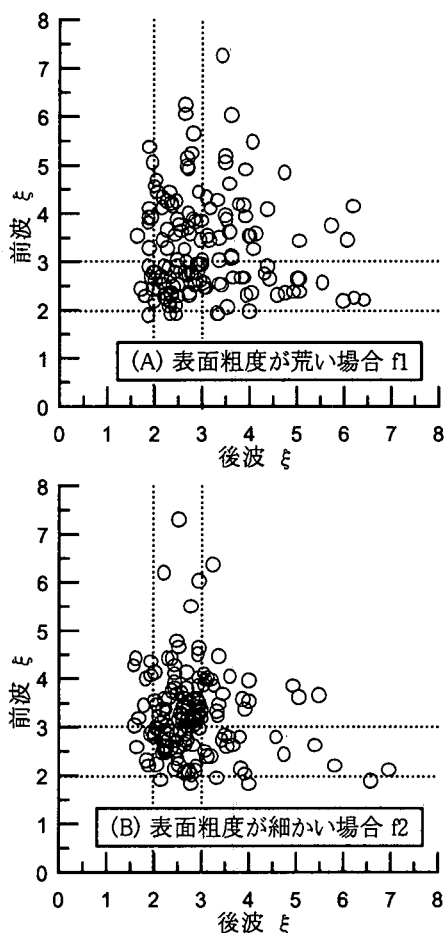


図-7 被災発生時における流速データと被災状況



図—8 被災発生前後の砕波相似パラメータ相関図

きな流速が作用することにより回転移動を開始し、流速の大きさは減少しても継続的に同一方向へ作用することで転落に至る状況が確認できる。一方、(A)の場合は斜面下向きへの作用流速が継続的に作用していないことから転落に至らずローリング運動を行うことを表している。

以上のことより、被覆ガラス玉の被災パターンは、波の作用履歴に伴うかみ合わせ効果の減少によるロッキング運動から離脱転落に至るものと推察される。そこで、このような被災メカニズムより被災をもたらす波浪限界条件として、上述した被災実験より被災直前の波と被災時の波との関係について検討する。すなわち、このような前後の波浪特性が明らかになれば、被災をもたらす波の組み合わせの発生確率が議論できることになる。

(2) 水理実験による考察

被災実験のVTR解析より斜面上における捨石モデルの被災は、波の打ち上げ時に斜面上向きに少し回転移動した後に引き波により転落する被災パターンを示した。

本研究では被覆材の被災を起こす波を後波、その直前の波を前波と称し、前後の波の波高、波形勾配及び砕波相似パラメータに関して両者の関係を整理検討した。その結果、波高、波形勾配については、前後の波の間に明確な関係が見出せなかった。しかし砕波相似パラメータ ξ の場合、図—8に示すようにバラツキがあるものの、斜面上の波の共振現象に関係する $2 < \xi < 3$ の領域 (Sawaragi ら, 1983) にほぼ集中していることがわかる。また、図 (A) に示す表面粗度の荒いガラス玉の場合は、 $2 < \xi < 3$ の領域に集中するものの、図 (B) に比較してバラツキが大きくなっている。この原因は表面粗度が荒いことから、(B) の表面粗度が細かい場合に比べてかみ合わせ効果が不均一になるためと考えられる。

5. 結 論

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に及ぼす影響について水理模型実験及び数値計算より検討を行ったもので、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ことがわかった。

(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ことがわかった。

(3) 被覆捨石の被災メカニズムについては、まず数値計算より波の作用履歴に伴うロッキング運動から離脱に至ることが確認できた。次に水理模型実験より被災を起こす前後の波浪条件が $2 < \xi < 3$ の領域に集中する傾向が高いことがわかった。

最後に本研究は科学研究費 (基盤研究 (C) (2))、研究代表者：松見吉晴) により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃 (2000): 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.
- 合田良實: [増補改訂] 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 187-188, 1990.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術研究センター, 296 p.
- Sawaragi, T., K. Iwata and C. Ryu (1983): Consideration of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to the resonance phenomenon, 8th Int. Harbour Congress, pp. 3.197-3.208.
- Van der Meer, J.W. (1987): Stability of breakwater armour-layers design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.