

高波の波群に伴う消波被覆材の被災特性に基づいた 造波信号長について

大野 賢一*・松見 吉晴**・児玉 広子***・木村 晃****

本研究は、被覆材の耐波安定実験における造波不規則波の構成波数に関する最小基準の究明を目的として、被覆材の被災現象の特徴である作用波履歴が関与する memory 型被災プロセスと関係付ける高波の波群の出現特性に及ぼす構成波数の影響について検討するものである。まず被災実験より被災率のバラツキが構成波数の増加に伴って減少し、被災発生時の碎波相似パラメータの大部分が 2~4 の領域に集中することを明らかにした。ついでマルコフプロセスに基づいた被災をもたらし連に関する理論的検討より、波数に伴う波群の出現回数の変動と被災率のバラツキとの間に強い相関を示し、波数 600 以上で両者がほぼ一定となることが認められた。

1. はじめに

従来、捨石材に関する安定重量評価に関しては、Van der Meer (1987) の安定公式のように被災実験に基づいた経験式が研究者毎に提案されているが、ある特定の経験式により他の研究者の実験データを整理できないことは事実である。この原因として、被覆材の被災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、それが研究者毎に異なるため被災の程度にバラツキが生じると考えられる。例えば、同一波浪スペクトルからつくられる不規則波であっても、造波信号の長さ（構成波数： M ）が異なれば、図-1 に示す高波の発生確率が変化することが大野ら（2002）により確認されている。また、被覆材の被災現象が一般に微動なローリング運動を繰り返しながら被覆材間のかみ合わせがゆるみ離脱転落に至る「作用波履歴が関係する memory 型の被災プロセス」であることから、特に高波の波群の出現回数は被災実験において重要なパラメータとなる。

そこで本研究は、被覆材の耐波安定実験における造波不規則波の構成波数に関する最小基準の究明を目的として、まず同一波浪スペクトル及び同一造波作用時間条件で被覆材の被災量に及ぼす造波不規則波の構成波数の影響、並びに被災時の波群特性について模型実験より検討し、ついでマルコフプロセスの仮定に基づいた高波の連に関する理論を用いて先の模型実験より得られた被覆材にとって危険な状態と考えられる高波の波群の出現回数と不規則波の構成波数の関係を検討したものである。

2. 被災実験における構成波数の影響について

(1) 実験条件

実験は断面 2 次元不規則波造波水槽（長さ 29 m×高さ 0.75 m×幅 0.5 m）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

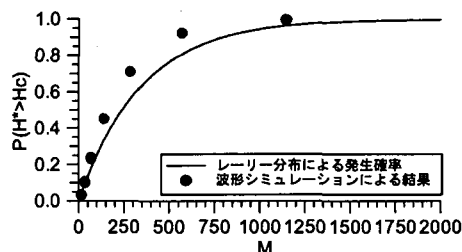


図-1 限界波高 H_e を越える波高の発生確率分布

19.9 m 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：2.5 cm）を採用し、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。被災実験では、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 $S=1$ ）に相当する波浪条件（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）毎に同一時間作用（約 27 分間）させ、計 700 波浪ケースを行った。

(2) 被災率に関する検討

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土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 M 、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 M の値は、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、構成波数が約 600 波程度になると被災率はほぼ一定となることが確認できる。これは、図-1 に示すように構成波数が多くなるにつれて、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、被災率

* 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

*** 正会員 修(工) 大分県庁

**** 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

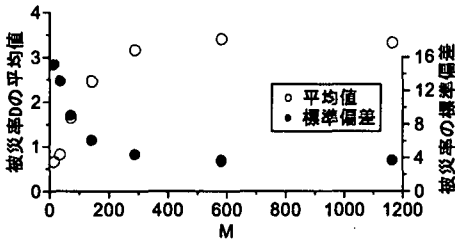


図-2 被災率と構成波数の関係

のパラッキに高波の発生が強く依存していることから、被災実験において造波不規則波の構成波数を考慮する必要があることが分かる。

(3) 碎波相似パラメータに関する検討

被災発生時の波浪条件と造波不規則波の構成波数の関係について検討するため、被災発生時の碎波相似パラメータ ξ について全 700 波浪ケースに対して統計的解析を行った。被災を起こす波の碎波相似パラメータ ξ は、被災材の被災状況を撮影した VTR 解析より被災発生時刻を特定し、同期させた水位変動の計測結果からゼロアップクロス法で定義した波高と周期より算出すると共に、被災を起こす直前の ξ についても算出した。ここでは、各々の ξ を添字の「被災時」と「直前」で区別している。

図-3 は、被災時と直前の ξ の結合確率分布を示したものである。図中の点は実験で得られた 3695 組の被災材の被災時と直前の ξ を示しており、その大部分は従来から指摘されている斜面上の波の共振現象 (Sawaragi ら, 1983) を含めた $2 \sim 4$ の領域に集中している。

これらの実験結果に対して、被災時と直前の ξ について階差 0.25 で相対頻度分布を求めたのが図中の棒グラフである。これら ξ の相対頻度分布について、理論モデルとしてワイブル分布を仮定し、変数として形状母数 β 、

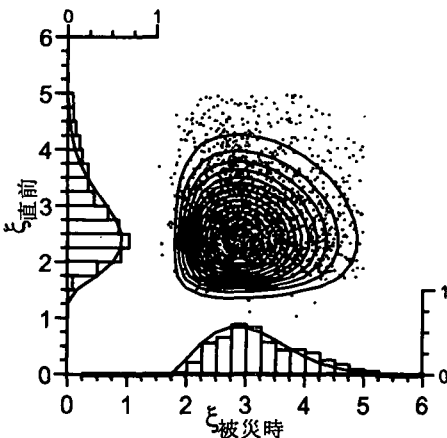


図-3 被災時と直前の ξ の結合確率分布

位置母数 ϵ 、尺度母数 k をそれぞれ被災時 ($\beta=2.0$, $\epsilon=1.8$, $k=3.3$) および直前 ($\beta=2.0$, $\epsilon=1.4$, $k=2.8$) として与えた。さらに、被災時と直前の ξ をそれぞれ独立と仮定すると、結合確率分布は図中実線で示すワイブル分布で近似できることが分かる。等高線図の初期値は 0.025 で間隔 0.025 である。このワイブル分布は実験結果をよく反映しており、被災が発生する可能性が高い $2 \leq \xi \leq 4$ の領域に入る被災時および直前の ξ の占める割合は理論計算より約 75.9% である。

3. 碎波相似パラメータに関する連モデル

碎波相似パラメータに関する検討結果より、被災発生時の ξ が以下の領域に大部分該当することが分かった。

$$2 \leq \xi \leq 4, \quad \xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H/L_0}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 β は堤体斜面の勾配、 L_0 は沖波波長である。本研究では、次のような場合に斜面上で水粒子速度が急増する共振現象がより強くなると定義する。

① $2 \leq \xi \leq 4$

② 波高 H は大きい方が共振現象はより強くなる
上記②については、波高と周期の結合確率特性について検討すると、2 次元分布では波高の大きな部分では、それらの波の周期は平均周期の 1.1 倍付近に集中する傾向がわかっている。従って、ここでは ξ は波高 H のみにより決定されるものとして、堤体斜面上の被災材の被災をもたらす高波の波群特性のモデル化を検討する。

式 (1) を波高で整理すると、波高の下限値 H_1^* および上限値 H_2^* は次式で与えられる。

$$H_1^* = \frac{\tan^2 \beta}{16} L_0, \quad H_2^* = \frac{\tan^2 \beta}{4} L_0 \dots \dots \dots (2)$$

ついで、すべての波を次の 3 つの rank に区分する。

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq H < H_1^* & \text{rank 1} \\ H_1^* \leq H \leq H_2^* & \text{rank 2} \\ H_2^* < H & \text{rank 3} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

rank 2 の波高の連については、初期確率はまず 1 波が最初に rank 2 に入った状態から始まり、その前の波は rank 1 または rank 3 に入った状態であることから、rank 2 の波から 1 回の推移後の波高がどの rank に入るかの確率は、次式で表される。

$$(0, 1, 0) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (p_{21}, p_{22}, p_{23}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 p_{21} : rank 2 から rank 1 へ推移する確率、 p_{22} : rank 2 から rank 2 へ推移する確率、 p_{23} : rank 2 から rank 3 へ推移する確率である。

以下同様にして j 回の推移後には、波高がどの rank に入るかの確率は次式で与えられる。

$$(p_{22}^{-1} p_{21}, p_{22}^{-1} p_{22}, p_{22}^{-1} p_{23}) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $p_{22}^{-1} p_{21}$ は j 波が rank 2 に入り、 $j+1$ 波目が rank 1 に入る確率、 $p_{22}^{-1} p_{23}$ は $j+1$ 波目が rank 3 に入る確率である。従って、連の長さが j となる出現確率 $P(j)$ は、次式で与えられる。

$$P(j) = p_{22}^{-1} (p_{21} + p_{23}) = p_{22}^{-1} (1 - p_{22}) \dots\dots\dots (6)$$

Kimura (1980) の研究によると、隣り合う波が rank 2 に入る確率 p_{22} は、波高の分布がレーリー分布に従うとすると次式で与えられる。

$$p_{22} = \frac{\int_{H_1^*}^{H_2^*} \int_{H_1^*}^{H_2^*} P(H_1, H_2) dH_1 dH_2}{\int_{H_1^*}^{H_2^*} P(H) dH} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$P(H_1, H_2) = \frac{4 H_1 H_2}{(1 - \kappa^2) H_{rms}^4} \exp \left[-\frac{H_1^2 + H_2^2}{(1 - \kappa^2) H_{rms}^2} \right] \cdot I_0 \left[\frac{2 \kappa H_1 H_2}{(1 - \kappa^2) H_{rms}^2} \right] dH_1 dH_2 \dots\dots\dots (8)$$

$$P(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp \left[-\frac{H^2}{H_{rms}^2} \right] dH \dots\dots\dots (9)$$

I_0 は 0 次の変形ベッセル関数、 κ は隣り合う波高の相関係数 $\gamma(H_1, H_2)$ を介して次式で与えられる。

$$\gamma(H_1, H_2) = \frac{1}{1 - \pi/4} \left[E(\kappa) - \frac{(1 - \kappa^2)}{2} K(\kappa) - \frac{\pi}{4} \right] \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $E(\cdot)$ 、 $K(\cdot)$ はそれぞれ第 1 種および第 2 種の完全楕円積分である。

4. 波群の出現特性に及ぼす構成波数の影響について

(1) 連の発生確率および平均連長に関する検討

ここでは、まず堤体被覆材の被災をもたらす rank 2 に入る碎波相似パラメータの連の出現に及ぼす構成波数の影響について、構成波数毎の式 (6) より解析される各連長 j における出現確率について検討を行う。

図-4 は、7 種類の信号長毎に実験波も含めて 3000 ケースの不規則波のシミュレーション波形より算出した連の出現確率と Kimura のマルコフチェーンによる理論値を示したものである。なお、式 (10) 中の隣り合う波高の相関係数については本研究で造波目標としている JONSWAP スペクトル ($\gamma=3.3$) および修正 Bretschneider 光易型スペクトルよりそれぞれ算定し与えている。これらの図より、波浪スペクトルの尖鋭度の違いにより出現確率値が異なるものの、構成波数が少ない場合 ($M=18, 36$) の出現確率は両スペクトルとも連長の増加に伴って理論値からのずれが大きくなり、造波目標の高波の波群特性を満足しない結果となっている。また、両図で理論値と構成波数が多い場合の実験値に違いが見ら

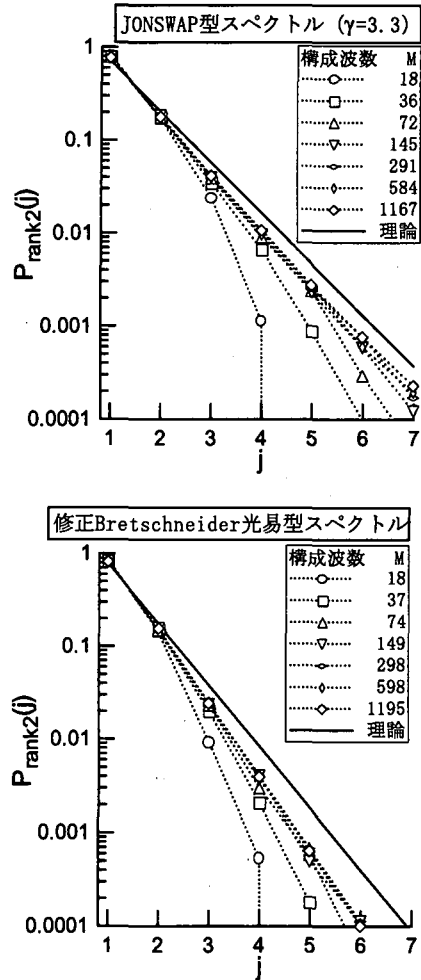


図-4 rank 2 に入る波高の連長の出現確率と構成波数

れるが、この原因は実験値に対して $2 \leq \xi \leq 4$ かつ H^* 以上の条件より求めており周期の影響が含まれているためと考える。

次に、平均連長 $\bar{j}$ について 7 種類の信号長毎に 3000 ケースのシミュレーション波形を対象に次式により解析を行った。

$$\bar{j}_{exp} = \sum j \cdot m_j / \sum m_j \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 m_j は連長 j に入る出現回数である。また、前述の連に関する理論より、平均連長は次式で与えられる。

$$\bar{j}_{cal} = 1 / (1 - p_{22}) \dots\dots\dots (12)$$

図-5 は、各信号長におけるシミュレーション波形に関する平均連長と構成波数の関係を示したものである。横軸は構成波数を示し、縦軸は各構成波数における計算結果を JONSWAP スペクトルおよび修正 Bretschneider 光易型スペクトルより計算された理論値で無次元化したものである。図より、明らかに構成波数が増加するに伴い一定値に漸近することがわかる。

以上のことより、連の出現確率や平均連長に及ぼす構成波数の影響に関しては、本研究において構成波数が584波より少ない場合に現れる可能性が高いと言える。

(2) 被災をもたらす波群の出現回数に関する検討

ここでは、 $2 \leq \xi \leq 4$ に入る連がいくらの時に被覆材にとって最も危険な状態になるか明らかではないが信号長の変化に伴う各連長の出現回数の変化より、高波の波群出現特性に及ぼす構成波数の影響について検討する。

いま、rank 2に入る波の総数 n が与えられたとき、式(11)の分子 $\sum j m_j$ は波高が rank 2に入る波の総数 n を表す。次式の各連長の出現確率の理論値と実験値の関係より、

$$p_{22}^{-1}(1-p_{22}) = m_j / \sum m_j \quad (13)$$

各連長の出現回数 m_j は、式(11)、(12)および式(13)より次式で与えられる。

$$m_j = n \cdot p_{22}^{-1}(1-p_{22})^2 \quad (14)$$

一方、rank 2に入る波の総数 n は、造波信号の M 個の構成波数の波高がレーリー分布に従うものとして以下のように算定できる。

$$n = M [\exp(-H_1^*/H_{rms}) - \exp(-H_2^*/H_{rms})] \cdots (15)$$

図-6は、JONSWAPスペクトルおよび修正 Bretschneider 光易型スペクトルにおいて、連長2および2以上の平均出現回数 ($n_{j-\text{exp}}$) とその理論値 ($n_{j-\text{cal}}$) の比、並びに出現回数の標準偏差 ($s_{j-\text{exp}}$) と平均出現回数の比を構成波数に関して示したものである。これらの図より、 $2 \leq \xi \leq 4$ に入る波群の出現回数に及ぼす構成波数の影響は、平均値で見るとほぼ同じであるが、出現回数のバラツキは構成波数が少ないほど大きくなるのがわかる。特に構成波数 M が600波以上の場合、バラツキはほぼ一定値に漸近する傾向が認められる。また、図-2において構成波数が少ない場合に見られる被災率の大きなバラツキは、図-6に示す被覆材にとって危険な状態と考えられる $2 \leq \xi \leq 4$ に入る波群の出現回数のバラツキが強く影響していることがわかる。

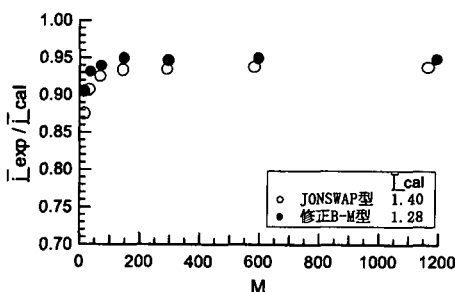


図-5 平均連長と構成波数

(3) 最大連長の及ぼす構成波数の影響

本研究では、 $2 \leq \xi \leq 4$ に入る連が具体的にいくらの時に被覆材にとって最も危険な状態になるか明らかではない。そこで、連が長い程、被覆材にとっては危険な状態になると考え、耐波安定実験に用いる不規則波に現れる連の最大連長に及ぼす構成波数の影響について検討する。

N 個の独立な連の標本の中の最大連長の確率分布は、木村・瀬山 (1985) の研究によると、連長が $j-1$ 以下になる確率 $P_1(j-1)$ は式(6)より次式で与えられる。

$$P_1(j-1) = \prod_{i=1}^{j-1} p_{22}^{-1}(1-p_{22}) = 1 - p_{22}^{-1} \cdots (16)$$

この確率より N 個の総ての連が $j-1$ 以下になる確率は $P_1(j-1)^N$ で与えられる。一方、少なくとも1つ以上の連が j 以上になる確率は、上記の余事象となり $1 - P_1(j-1)^N$ で与えられる。同様な考え方のもとに N 個の連の中で少なくとも1つ以上の連が $j+1$ 以上になる確率は $1 - P_1(j)^N$ となる。従って、 N 個の連の標本の中で最大の連長が j となる確率 $P_2(j)$ は次式で与えられる。

$$P_2(j) = \{1 - P_1(j-1)^N\} - \{1 - P_1(j)^N\} \\ = (1 - p_{22}^{-1})^N - (1 - p_{22}^{-1})^N \cdots (17)$$

N 個の連から成る母集団の最大連長に関する期待値 $j_{\max}$ は、次のようになる。

$$j_{\max} = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot P_2(i)^N = \sum_{i=1}^{\infty} N C_i \frac{(-1)^{i+1}}{1 - p_{22}^{-1}} \cdots (18)$$

なお、式(18)の $N C_i$ は N 、 i が大きくなると実質的な計算が不可能になるため、木村・瀬山 (1985) は近似計算

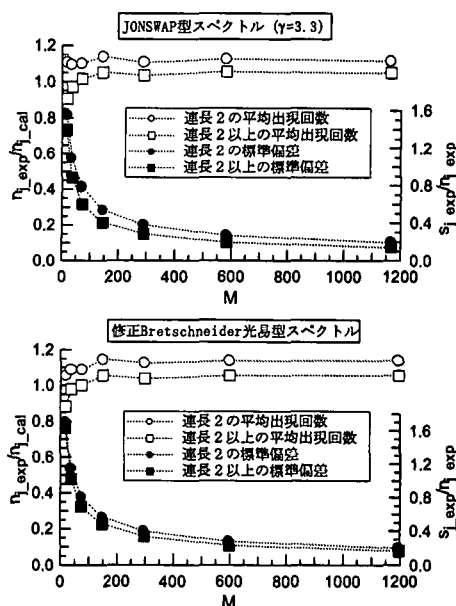


図-6 $2 \leq \xi \leq 4$ に入る波群の出現回数と構成波数

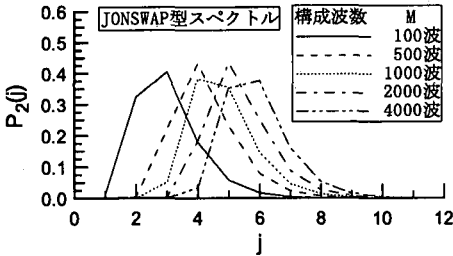


図-7 最大連長の確率分布

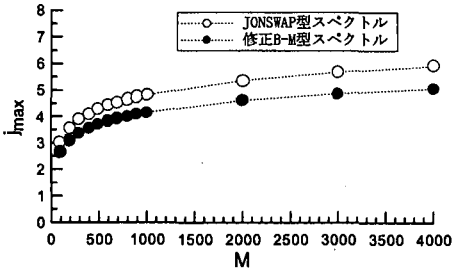


図-8 最大連長の期待値と構成波数の関係

式として次式を誘導している。

$$j_{\max} = -\frac{\ln N + \gamma}{\ln p_{22}} + \frac{2p_{22} + 1}{3(p_{22} + 1)} \quad (19)$$

ここに、 γ はオイラー定数(=0.5772)である。

造波不規則波の構成波数 M と連の個数 N の関係は、連の繰り返し間隔の平均値(トータルラン)を用いて以下のように表せる。すなわち、 $2 \leq \xi \leq 4$ を波高で定義した場合、この領域の上限の波高 H_2^* を超える波高の出現確率が本実験ではほぼゼロであることから、トータルラン j_T の算定に当たっては H_1^* を超えて続く波高も H_1^* を超える確率 p_{22} と、 H_1^* を超えなくて続く波高も H_1^* を超えない確率 p_{11} の2種類のrankを対象に次式で算定した。

$$j_T = \frac{1}{1 - p_{22}} + \frac{1}{1 - p_{11}} \quad (20)$$

従って、構成波数 M が与えられた時の連の最小の個数 N はトータルラン j_T より次式で与えた。

$$N = M/j_T \quad (21)$$

図-7 は各構成波数における最大連長の確率分布を示

したもので、波浪スペクトルがJONSWAP型で $M=100, 500, 1000, 2000, 4000$ の場合のものである。構成波数の増加に伴う確率分布の連長が大きい方へのシフトの変化量は、波数が小さい時の方が大きい。また、図-8に示す最大連長の期待値と構成波数の関係における波数が小さい場合 $j_{\max}$ の変化量は大きく、波数の増加と共に一定値に漸近することがわかる。ここで、本実験で最も長い造波信号長32768(約1000波)を1つの目安とすると $M=600$ 波程度でも最大連長の期待値はそれほど大きく異ならない。現在の所、被覆材の被災にとって最も危険な連長が不明であるため最大連長に注目したが、2番目に長い連、その次に長い連の期待値に及ぼす構成波数の影響について今後検討する予定である。

5. 結 論

以上のことより、堤体被覆材の被災には波群特性により大きく変わる可能性があり、造波不規則波の構成波数に伴う波群の発生特性と被災結果のパラツキとの間に強い相関が認められた。また本研究では、高波の連の出現特性に関する検討結果より、造波不規則波信号の最小構成波数に関して600波以上を1つの目安として結論付けるが、連に関する順序統計量の確率特性に注目した検討を行う予定である。

謝辞：本研究を進めるに当たりご協力を頂いた鳥取大学総合情報処理センターの亀山知文技官に感謝の意を表す。本研究は科学研究費(基盤研究(C)(2)、代表者：松見吉晴)の一部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・児玉広子・木村 晃(2002): 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.
- 木村 晃・瀬山 明(1985): 不規則波の連の最大長の確率特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 194-198.
- Kimura, A. (1980): Statistical properties of random wave groups, Proc. 17th ICCE, pp. 2955-2973.
- 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.