

不規則波の浅海変形モデルについて

岩 垣 雄 一*・ 間 瀬 肇**・ 田 中 剛***

1. ま え が き

海浜変形の外力,あるいは海岸構造物に働く外力としての浅海域での波浪の特性を明らかにすることは非常に重要な問題であり,不規則性を考慮した設計法の確立の必要とあいまって,不規則波の浅海域での変形特性を扱う研究は少なくない。

Battjes¹⁾は深海域での波高分布として Rayleigh 分布を仮定し,浅海域では波高の大きな波が砕波限界波高を越えたと砕け,以後は各水深に対応する砕波限界波高を保持するというモデルを考え,同時に平均水位の変化量をも計算した.合田²⁾は Battjes と同様なモデルであるが,砕波限界波高以下の波でもある確率をもって選択砕波し,砕波後は小さい波高の波に再生されるという砕波変形モデルを考えた.水口ら³⁾は,合田の選択砕波という考えと,砕波した波が残存確率に比例して再生するという考えに対する疑問から,不規則波群の主要な波に対して規則波の波高変化モデルを適用し,若干の現地観測結果と比較している.菅原ら⁴⁾も同様に,単一規則波の波高変化の計算モデルを基礎として,波高分布として Rayleigh 分布を持つ不規則波の浅水変形を計算している。

本研究も,不規則波群の個々の波が規則波としての非線型浅水変形を行い,砕波点に達したあとは bore 状の波となって進行するというモデルを考える.水口らの規則波の砕波後の波高変化モデルでは,一般に沖波波形勾配と斜面勾配の影響を導入しにくい,本研究では surf similarity parameter が含まれる Battjes の bore モデル⁵⁾を修正して用いることにより,砕波後の波高変化に対する沖波波形勾配および斜面勾配の影響を導入することができる.また,不規則性を表わす要素としては波高分布のみを与える場合が多いが^{1),2),4)},砕波現象は周期も大きく影響するので,波高・周期の結合分布を採用する方がより現実に近くなる.しかし,従来より報告されている結合分布は必ずしも確立されたものではなく,深海域

において特定の分布形を規定することで,入力データの段階より実験値との間に誤差が生じる恐れがある.そこで,本研究では結合分布を導入する前の段階として,一様水深部の水位記録からゼロアップクロス法により得られる波高と周期を入力データとして用いることにする.そして,不規則波の砕波現象を含めた浅海域の波高変化を調べるとともに,上記のモデルから得られる計算結果(個々の波を規則波として計算した結果を加え合わせて不規則波の波高変化を算定)と実験結果とを比較し,この方法の妥当性を検討しようとするものである。

2. 規則波の浅海域での波高変化モデル

(1) 砕波前の波高変化と砕波限界波高

砕波前の波高変化に関しては,計算上の簡便さを考慮して,首藤⁶⁾の非線型長波理論による次式を用いることにする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{gHT^2}{h^2} &\leq 30 \text{ のとき, 微小振幅波理論} \\ 30 &\leq \frac{gHT^2}{h^2} \leq 50 \text{ のとき, } Hh^{2/7} = \text{const.} \\ 50 &\leq \frac{gHT^2}{h^2} \text{ のとき,} \\ &Hh^{5/2} \left(\sqrt{\frac{gHT^2}{h^2}} - 2\sqrt{3} \right) = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

なお,式(1)の実際の計算は合田²⁾による方法を用いた。

砕波限界式については,合田が整理した砕波指標のうち, $H_b/h_b \sim h_b/L_0$ の曲線群を数式化した次式を用いることにする。

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right\} \right] \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $A=0.17$, $\tan \theta$ は海底勾配, L_0 は沖波波長である。

(2) Battjes の bore モデル⁵⁾とその適用

(a) Battjes の bore モデルの修正

砕波後の surf zone における波高変化を求めるために,エネルギー平衡式を導入し, bore 状の波となって

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 兵庫県土木部港湾課

進行する Battjes のモデルを採用する。これは碎波後の波高変化に対して、沖波波形勾配および斜面勾配の影響が surf similarity parameter として導入できる利点があるからである。

前後の水深が h_2 と h_1 である bore の単位幅当りのエネルギー逸散率 D' は次式で与えられる。

$$D' = \frac{1}{4} \rho g (h_2 - h_1)^3 \left\{ \frac{g(h_1 + h_2)}{2h_1 h_2} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h を平均水深とすれば、 $h_1 h_2 = O(h^2)$ であり、 D' は次のように書き換えられる。

$$D' = B' \frac{1}{4} \rho g \frac{(h_2 - h_1)^3}{h} (gh)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、 B' は $O(1)$ の係数である。いま、これを surf zone における碎波後の波に適用するが、泡の高さ ($h_2 - h_1$) を Battjes は次のようにおいた。

$$\left. \begin{aligned} h_2 - h_1 &= \beta' H \quad (\beta' \leq 1) \\ \beta' &\approx H/(\gamma h) \\ \gamma &\approx 0.7 + 5 \tan \theta \quad (0.01 \leq \tan \theta \leq 0.1) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらを式 (4) に代入すると次式のようになる。

$$D' = \frac{B'}{4\gamma^3} \rho g H^2 (gh)^{1/2} \left(\frac{H}{h} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (6)$$

これを単位面積当りの平均逸散率 D に書き換えると、波速を $c \approx \sqrt{gh}$ として、

$$D = \frac{D'}{L} = \frac{D'}{cT} \approx \frac{B}{4\gamma^3} \frac{\rho g H^2}{T} \left(\frac{H}{h} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。また単位幅当りのエネルギーフラックス P は、 $c_g \approx c \approx \sqrt{gh}$ として、

$$P \approx \frac{1}{8} \rho g H^2 (gh)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と近似される。これらをエネルギー平衡式に代入し、 $h = -x \tan \theta$ 、 $\bar{H} = H/H_b$ 、 $\bar{h} = h/h_b$ (H_b 、 h_b はそれぞれ碎波波高および碎波水深) とおくと、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\bar{h}} (\bar{H}^2 \bar{h}^{1/2}) - K \bar{H}^6 \bar{h}^{-4} &= 0 \\ K &= 2B\gamma \frac{(h_b/g)^{1/2}}{T \tan \theta} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) を境界条件 $\bar{h}=1$ において $\bar{H}=1$ のもとで解くと、碎波後の波高比 $\bar{H}$ として

$$\bar{H}^{-4} = \left(1 - \frac{4}{9} K \right) \bar{h} + \frac{4}{9} K \bar{h}^{-7/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。なお、 K の値は $H_b = \gamma h_b$ 、 $L_0 = gT^2/2\pi$ とすると、

$$K = \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} B\gamma^{1/2} \xi_0^{-1} \approx \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} B\gamma^{1/2} \xi_0^{-1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに ξ_0 は surf similarity parameter ($= \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$) である。

Battjes の報告では、水深は wave set-up を取り入れた平均水深とし、碎波点からの surf zone 内での平均水位の勾配を、海底勾配の 1/5 と仮定している。そのため、式 (5) の第 3 式に現われる $\tan \theta$ として、実際の値の 0.8 倍したものをを用いている。本研究では、静水深に順次平均水位の変化量を考慮して計算を進めていくことにする。平均水位の変化量は、微小振幅波理論により算出するが、そのままでは実測値よりも過大評価される傾向があると報告されているので、ここでは、微小振幅波理論より得られる値の 0.6 倍を用いることにした。さらに、式 (9) の係数 B の値をここでは一定とせず、水深の関数として与える。係数 B の値の決定には、Simgamsetti ら⁷⁾の実験や佐伯ら⁸⁾による実験の結果とを参照して、次のように決定した。

斜面勾配が 1/20 よりも急な場合:

$$\left. \begin{aligned} B &= 1 & (0.9 \leq h/h_b \leq 1.0) \\ B &= 13 - \frac{40}{3} \frac{h}{h_b} & (0.6 \leq h/h_b \leq 0.9) \\ B &= 5 & (h/h_b \leq 0.6) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

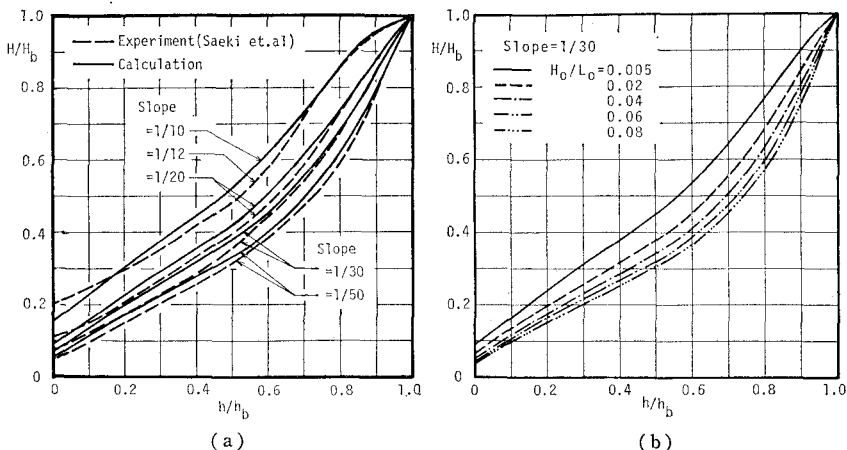


図-1 碎波後の波高変化の計算結果

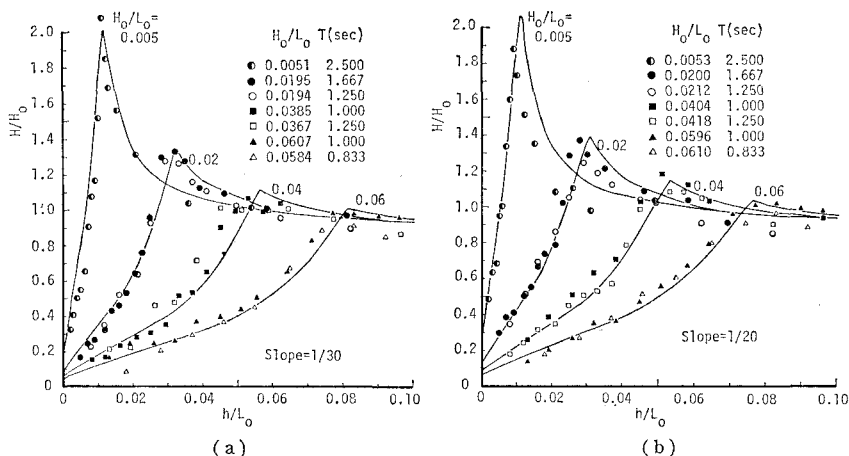


図-2 規則波の波高変化に対する計算値と実験値との比較

斜面勾配が 1/20 に等しいか、それよりも緩やかな場合:

$$\left. \begin{aligned} B &= 11 - 10 \frac{h}{h_b} & (0.6 \leq h/h_b \leq 1.0) \\ B &= 5 & (h/h_b \leq 0.6) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(b) 計算方法および結果

まず平均水位の変化量が 0 の状態で各地点の波高を計算し、その結果を用い平均水位の変化量の第 1 次近似を求める。次に初期水深に第 1 次近似の平均水位の変化量を加え、再び波高を計算する。この計算を繰返し、平均水位の変化量が 1 回前の計算結果と比べて 1% 以内に収束したら、さらにもう 1 回計算を行い最終結果とする。

図-1 (a) はこのようにして求めた計算結果 ($H_0/L_0 = 0.02$) と佐伯らの実験結果とを比較したものである。この図から、 h/h_b が 0.5 付近では計算値の方が若干大きく、逆に汀線付近では若干小さくなるが、平均的には両者の傾向は良く一致しているのがわかる。図-1 (b) は斜面勾配を 1/30 と一定にし、沖波波形勾配を変化させた場合の計算結果であり、沖波波形勾配が大きいほど波高減衰が大きいことを示し、この傾向は中村ら⁹⁾の実験結果と同じである。

(3) 実験結果および考察

図-2 (a), (b) は斜面勾配別に、計算結果とともに、実験で得られた規則波の波高変化をプロットしたものである。ここでは、横軸は静水深を沖波波長で、縦軸は波高を沖波波高で除して無次元化したものを用いた。計算結果を実験結果と比較してみると、砕波前は大きく、砕波直後は小さくなっているが、ほぼ良く一致しているといえる。ここには載せなかったが、斜面勾配が 1/10 の結果は、沖波波形勾配が小さい場合、砕波後の飛沫のため波形が安定せず、あまり一致が良くなかった。

3. 不規則波の浅海域での波高変化モデル

(1) 波高変化の計算方法

規則波の浅海変形に対してほぼ良好な結果が得られた計算モデルを、不規則波の個々の波に適用し、浅海域での波高の頻度分布や代表波高の変化を計算する。

入力データとしては、斜面勾配、一樣水深部の水位記録よりゼロアップクロス法で得られる波高と周期、および波高を求めたい地点の水深が必要である。そして、入力データのうち最大波長 $L_{\max} = 1.56 T_{\max}^2$ の 1/2 の水深か、入力データの最大水深のどちらか大きい方を深海水深として設定する。

不規則波の個々の波の砕波限界は、合田の砕波指標の近似式 (2) を用いるが、係数 A の値については実験により検討する。水深は規則波の場合と同様、まず静水深により各地点の波高の 2 乗平均値を求め、それによって平均水位の変化量を求め、それを静水深に加えて水深を補正していき、その繰返し計算を収束するまで行う。図-3 に計算のフローを示す。

(2) 不規則波の波高変化に関する実験

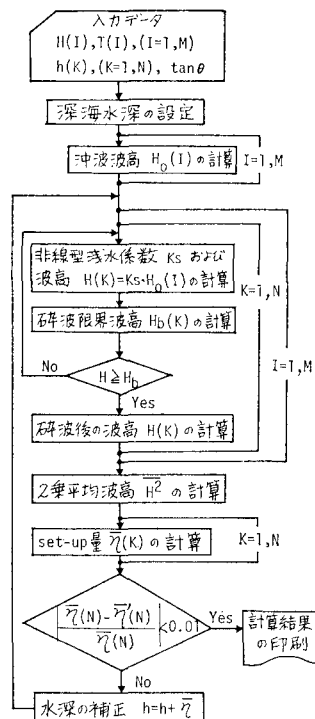


図-3 計算のフロー

実験は京都大学工学部土木系地下実験室に設置されている、長さ 27 m、幅 50 cm、高さ 70 cm の両面ガラス張り水槽を用いて行った。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置してある。

実験に用いた不規則波は、岩垣・木村による Pierson-Moskowitz 型スペクトルをシミュレートしたもので、そのスペクトルのピーク周波数は、0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 Hz の 5 種類、斜面勾配は 1/30, 1/20 および 1/10 の 3 種類を用いた。水深は一樣水深で 50 cm と一定にした。

まず、不規則波の砕波限界の検討のため、砕波時の様子を 16 mm シネカメラで撮影した。なお、今回の実験は静水面と斜面上端部を一致させて行ったが、その理由は、従来不規則波は規則波に比べて砕波しやすいと報告されており、その原因は不規則なもどり流れにあると考

えられるため、斜面上端部と静水面を一致させることによって、もどり流れの影響を少なくできるのではないかと考えたからである。撮影したフィルムは現像の後、フィルムモーションアナライザーで砕波時の波高、波長および水深を読み取った。

不規則波の浅海域における波高変化の測定には容量式波高計 11 台を用い（最も浅い測定水深は 4 cm）、14 チャンネルのレコーダーに記録した後、0.04 sec ごとに A-D 変換を行い、解析に用いた。

(3) 実験結果および考察

図-4(a), (b) は砕波限界を H_b/h_b と h_b/L_0 の関係でまとめたもので、沖波波長 L_0 は砕波時の波長より微小振幅波理論を用いて求めた。また、この図は空間的なゼロ

アップクロス法で読取ったものである。図中の実線は式(2)を示したもので、破線は式中の係数 A の値を 0.13 ~ 0.16 まで変化させたものである。実験値のばらつきは大きい、 h_b/L_0 が増加するにつれ H_b/h_b が減少する傾向がみられる。岩垣・木村¹⁰⁾の実験結果と比べると、 H_b/h_b の値が大きくなっており、もどり流れの影響は多少少なくなっているようであるが、ゼロダウンクロス法で定義した樫木ら¹¹⁾の結果と比べると大差なく、不規則波が同一の波高と周期をもつ規則波より砕波しやすいのは、もどり流れの影響が大きいためであるという結論は下せなかった。また同一のデータをゼロダウンクロス法で読取りまとめたが、図-4 に比べ h_b/L_0 の変域が狭くなるのみで、大差なかった。計算において不規則波の砕波限界を決定するために、ここでは式(2)の A の値を規則波よりも若干小さく $A=0.16$ とすることにする。

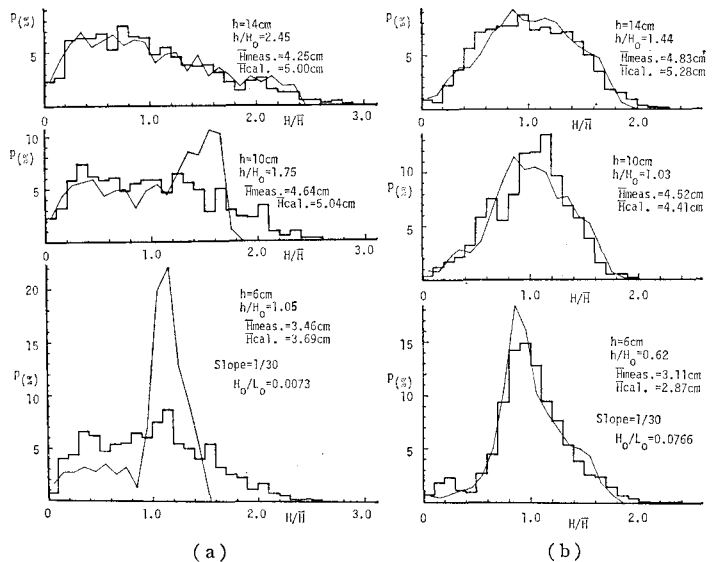


図-5 水深減少に伴う波高の頻度分布の変化

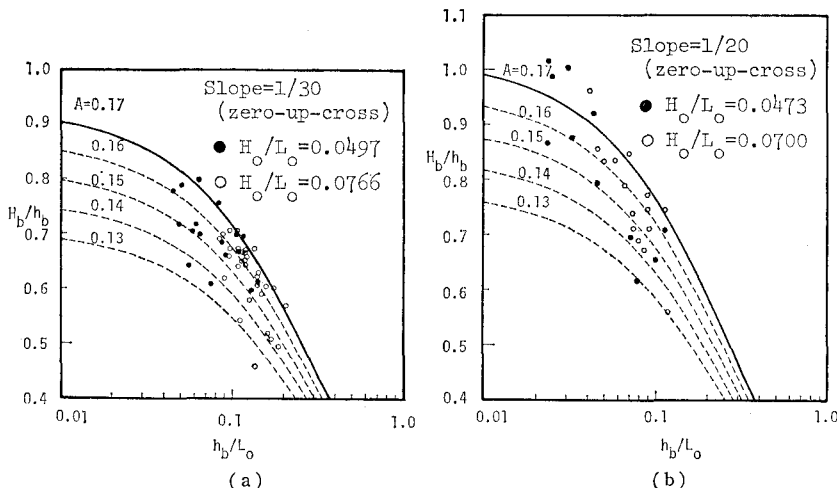


図-4 不規則波の砕波限界 (H_b/h_b と h_b/L_0 の関係)

図-5 (a), (b) は斜面勾配 1/30 のときの水深減少に伴う波高の頻度分布の変化を示したもので、図中の折線は計算結果である。図の (a) は実験と計算の結果があわない場合、(b) は良くあう場合である。また、 H_0 , L_0 はそれぞれ一樣水深部の記録から得られる有義波を用いた沖波波高と沖波波長で、図中には各地点の水深、水深沖波波高比および実験結果

と計算結果の平均波高が示してある。他のケースも同様に調べて、実験結果と計算結果を比較すると、次のことがわかった。(i) 水深の比較的深い所(14 cm 以深)では両者の対応はよい。(ii) 水深の浅い地点では、沖波波形勾配が小さい場合に両者の対応が悪く、実験結果の方が計算結果に比べ、平坦な分布形をしている。

図-6は斜面勾配 1/30 における水深減少に伴う有義波高と平均波高の変化をプロットしたものである。実験結果をみると、規則波のような碎波後におこる波高の急激な減少はみられず、また沖波波形勾配が小さくなるにつれて $H_{1/3}/H_0$ あるいは H_{mean}/H_0 の波高比が大きくなっているのがわかる。ただし、斜面勾配が 1/10 の場合には沖波波形勾配が小さくとも波高比が大きくなっていない場合もあった。計算結果の方も実験結果とはほぼ同様の傾向を示しているが、碎波帯以深では過大評価、汀線に近づくとき過小評価となっており、特に有義波高の変化に顕著に現われている。本計算モデルでは、一般に碎波後の波高変化を過小評価する傾向にある。その理由として、一つはサーフビートによる水位動揺を考慮していないこともあるが、もう一つは不規則波の碎波後の波高減衰が規則波のそれよりも小さいことが考えられる。

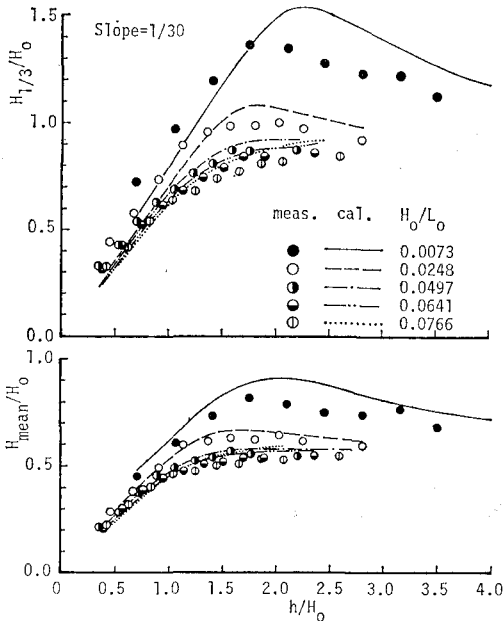


図-6 水深減少に伴う有義波高、平均波高の変化

以上、不規則波の波高はゼロアップクロス法で定義したが、ゼロダウンクロス法で定義したものについても検討した。その結果、水深の浅い地点で波高の頻度分布の小波高部分が大きくなるが、有義波高にはほとんど差がなかった。また、岩垣・木村¹²⁾のデータを用いて、水深減少に伴う波高の頻度分布の変化を調べたが、今回の実

験で得られたように、沖波波形勾配の小さい場合は平坦な分布形をしていた。

4. あとがき

本研究は、まず規則波の碎波を含む浅水変形の計算モデルを作り、実験を行ってその適合性を調べた。次に、不規則波の個々の波について適用し、実験結果と比較した。その結果、規則波の波高変化に対しては、実験結果と計算結果とは良い一致を示すが、それを不規則波の個々の波に適用した場合、両者は規則波ほど良い一致を示さず、特に沖波波形勾配の小さいときに、両者の対応は良くないことがわかった。

最後に、本研究を行うにあたり種々御助言を頂いた京都大学工学部酒井哲郎助教授並びに鳥取大学工学部木村晃助教授、ならびに実験に協力して頂いた当時学部学生駒口友章君(現日本テトラポッド株式会社)に感謝の意を表わすとともに、この研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(1)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Battjes, J. A.: Setup due to irregular waves, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vancouver, pp. 1993~2004, 1972.
- 2) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59~106, 1975.
- 3) 水口 優・松田仲次: 現地不規則波浪の浅海変形について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 134~138, 1980.
- 4) 菅原輝男・山本正昭: 波の浅水変形計算モデル, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 80~84, 1978.
- 5) Battjes, J. A.: Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves, Manuscript, Delft University of Technology, 1978.
- 6) 首藤伸夫: 非線型長波の変形——水路幅、水深の変化する場合——, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57~63, 1974.
- 7) Singamsetti, S. R., H. G. Wind: Breaking waves—characteristics of shoaling and breaking periodic waves normally incident to plane beaches of constant slope, Delft hydraulics laboratory, Report on Investigation, M1371, 1980.
- 8) 佐伯 浩・佐々木幹夫: 碎波後の波の変形に関する研究(2), 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 39~44, 1974.
- 9) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 碎波による波の変形に関する研究, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 71~75, 1966.
- 10) 岩垣雄一・木村 晃・岸田典史: 斜面上における不規則波の碎波に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 102~106, 1977.
- 11) 榎木 亨・岩田好一郎・石井敏之: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 143~147, 1980.
- 12) 岩垣雄一・木村 晃: 浅海域における不規則波の分散特性について, 京都大学防災研究所年報, 第20号 B-2, pp. 493~512, 1977.