

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1090

December 2004

時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波計算法の適用性

平石 哲也

峯村 浩治

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|-----------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. まえがき | 4 |
| 2. 時間発展型擬似段波モデルの適用 | 4 |
| 2.1 時間発展型擬似段波モデルの概要 | 4 |
| 2.2 平面二次元への適用 | 5 |
| 3. モデル地形における適用 | 5 |
| 3.1 すり鉢型地形における砕波判定の検証 | 5 |
| 3.2 一様勾配斜面上における波高分布特性 | 6 |
| 3.3 球面浅瀬地形における波高分布特性 | 7 |
| 4. 現地地形における適用 | 8 |
| 4.1 沖合防波堤地形における検証 | 8 |
| 4.2 リーフ地形における検証 | 10 |
| 5. 結論 | 11 |
| 6. あとがき | 11 |
| 参考文献 | 12 |
| 記号表 | 12 |

Applicability of Wave Breaking Calculation Method with Quasi-Bore Model

Tetsuya HIRAISHI*
Koji MINEMURA**

Synopsis

As a wave breaking model in the Boussinesq equation, " The quasi-bore model " was developed by Hara and Hirayama et al.(2003). This model assumes that the energy loss due to hydraulic jump bore in the short space and at a short time becomes the same to the wave energy loss in wave breaking during one unit of time. Since original of the quasi-bore model was a one-dimensional section model, some extension is necessary to apply it to the two-dimensional plane wave breaking model.

The paper studied on the applicability of the one-dimensional quasi-bore model in the two-dimensional wave transformation model in the Boussinesq equation. The wave breaking computation term was not modified and directly employed in the Boussinesq equation terms.

In the paper, the wave breaking transformation on uniform slope was discussed at the first. The wave height gap from the results derived from the former wave breaking model was expressed. Secondary, the wave transformation on circular reefs and around offshore breakwaters were demonstrated and compared with the experimented results.

The wave height computed in the one-dimensional quasi-bore model agreed well with the experimental wave height in the studied model. The wave direction becomes almost normal to the depth contours, and wave directionality is small. However, when wave breaks in the ocean of the multi-directional irregular waves, application of the quasi-bore model was not perfect.

Key Words: Boussinesq equation, wave breaking, vertical water pressure gradient,
hydraulic jump bore, two-dimensional application

* Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department, Doctor, Engineering
** Trainee, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department (ECOH CORPORATION Ltd.)
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution
Phone : +81-46-8445042 Fax : +81-46-8413888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波計算法の適用性

平石 哲也*
峯村 浩治**

要 旨

ビジネスモデルにおける砕波モデルとして, Hara and Hirayama et al. (2003) により, 「時間発展型擬似段波モデル」が開発された. この砕波モデルは「非定常な砕波現象における単位時間あたりのエネルギー減衰量が, ある微小時間および微小空間における跳水によるエネルギー損失に等しい」と仮定したものであり, 砕波の形態によらず, 統一的に扱うことの出来る砕波モデルである. しかし, 時間発展型擬似段波モデルは断面一次元モデルであるため, 実務において汎用的に用いるためには, 平面二次元モデルに砕波モデルを組み込む必要がある. 跳水の理論自体が断面一次元における理論であるため, 平面モデルとして適用するためには, 適用範囲を限定した使用法を導き, 結果が近似的に妥当と判断出来る範囲を示す必要がある. よって, 本研究では『浅水域で起こる砕波変形は, 屈折変形等により波の主方向が, 斜面の等水深線にほぼ直角になった状態で発生する』という条件の基で砕波モデルの適用を行った.

まず, その砕波モデルを用いて, 一様勾配地形において入射角が変化した場合における適用性について既往の砕波モデルと比較し, その差違を明らかにした. さらに, 様々な現地地形において実施された水理実験結果を用いて, 段波モデルにおける再現計算を行い, 本砕波モデルの適用性の確認を行った. その結果, 波の屈折により多方向性が弱くなり, 砕波の進行方向が砕波減衰を考慮した計算軸方向と同一の場合には, 段波モデルの平面計算への適用が可能であることが判った. しかし, 多方向性が強い海域において砕波する場合には, 本砕波モデルの適用が困難であった.

キーワード: ブジネス方程式, 砕波, 鉛直方向圧力勾配, 跳水, 平面適用

* 海洋・水工部波浪研究室長 博士 (工学)

** 海洋・水工部波浪研究室研修生 (株式会社 エコー)
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話: 046-844-5042 Fax: 046-841-3888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

1. まえがき

ブシネスクモデルにおける砕波モデルとして、Hara and Hirayama et al. (2003) により、「時間発展型擬似段波モデル」(以下、段波モデルと称す)が開発された。この段波で近似した砕波モデルは「非定常な砕波現象における単位時間あたりのエネルギー減衰量が、ある微小時間および微小空間における跳水によるエネルギー損失に等しい」という仮定に基づいたものであり、進行波および重複波の砕波を統一的に扱うことの出来るモデルである。しかし、この段波モデルは断面一次元砕波モデルであり、実務において汎用的に用いるためには、平面二次元計算式に組み入れる必要がある。また、跳水の理論自体も断面一次元であるため、平面モデルとして適用するためには様々な課題が上げられる。まず、領域を斜めに進行する波を考えた場合に、現在のADI法による差分法において、各成分に一次的に分解される段波によって砕波が評価可能なのか、また、砕波減衰を考慮すべき平面的な範囲をどのように設定するのか等である。

よって、本研究では『浅水域で起こる砕波変形は、屈折変形等により波の主方向が、斜面の等水深線にほぼ直角になった状態で発生する』という条件の基で砕波モデルの適用を行った。まず、基本地形における検討として、一様勾配地形において、入射角が変化した場合に砕波の表現が可能となる適用範囲について、既往の砕波モデルと波高を比較し、その差違を確認した。さらに、様々な現地地形において実施された水理実験結果を用いて、本砕波モデルによる再現計算を行い、適用性と適用限界について確認した。

2. 時間発展型擬似段波モデルの適用

2.1 時間発展型擬似段波モデルの概要

段波モデルにおける、砕波判定および砕波減衰量は、(1)式及び(2)式により求める。(1)式はブシネスク近似の圧力方程式により求めた水表面における鉛直圧力勾配を示したものである。理論上は、圧力勾配0の時に砕波することになるが、Hara and Hirayama et al.(2003)によれば、一様斜面の進行波による砕波や部分重複波を統一して判定するため、砕波判定のしきい値は圧力勾配を0.7とすると良いとしている。また、砕波によるエネルギー逸散量は(2)式により算出し、(3)式に示す運動方程式において、減衰項として左辺第4項により考慮する。図-1は(2)式及び(3)式に示した水深および圧力項の示す量を模式的に示した図である。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = g - \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{D} \right) - D \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{P}{D} \right) \quad (1)$$

$$\Delta E = \frac{1}{\rho g} \frac{D_0}{D_1 D_2} (\hat{P}_1 - \hat{P}_2 + \hat{P}_0) - \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$\text{ただし, } D_0 = \frac{1}{2}(D_1 + D_2), \hat{P}_1 = \int_{h_1}^{\eta_1} p_1 dz, \hat{P}_2 = \int_{h_2}^{\eta_2} p_2 dz,$$

$$\hat{P}_0 = - \int_{-h_1}^{\eta_0} p_0 dz + \int_{-h_2}^{\eta_0} p_0 dz$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + gD \frac{\Delta E}{L} \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial^3 P}{\partial t \partial x^2} + Bgh^3 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

- c : 波速
- D : 全水深
- g : 重力加速度
- h : 静水深
- P : x方向の線流量フラックス
- Q : y方向の線流量フラックス
- p : 圧力
- \hat{P} : 海底面から水表面までの圧力積分
- \bar{u} : 断面平均流速
- ΔE : 跳水によるエネルギー損失水頭
- η : 水位
- ρ : 水の密度
- L : 波の波長
- B : 分散補正係数

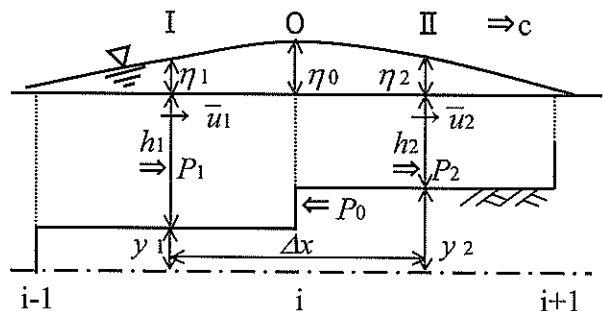


図-1 時間発展型擬似段波モデルの模式図

2.2 平面二次元への適用

段波モデルの平面二次元への適用は、一次元的な跳水の理論をいかに平面二次元モデルで取り扱うかがポイントとなる。段波モデルでは、砕波判定は鉛直圧力勾配がスカラー量のみで求められるため、波向によらず判定することが可能である。しかし、跳水によるエネルギー逸散量を算定する際には、波の進行方向により、減衰範囲を平面的に判定する必要がある。例えば、多方向不規則波中において、個々の波形の波速を知ることが困難なのと同様に、平面的に重畳する波浪の砕波の向き（個別波の波向）を明確に知ることは容易ではない。そこで、簡単のため、浅海域の斜面上で砕波する波の主方向が計算軸と一致するように計算領域を設定する。つまり、計算軸と平行な方向の一次元的な段波として扱えるような計算格子をあらかじめ設定しておけば、砕波時の波向を判定する必要は無く、一次元段波モデルを近似的に適用できる。この手法は砕波する波の多方向性が弱く、砕波が波の進行方向に砕けているという状態が成立つ範囲でのみ有効である。

よって、本研究における適用は、砕波判定には(1)式をそのまま用い、(4)式に示す x 方向の運動方程式の左辺第 7 項で砕波減衰を考慮するものとし、(5)式の y 方向の運動方程式では砕波減衰項は含まない。なお、圧力勾配による砕波判定値は断面二次元においてチューニングされた 0.7 を準用する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \sigma P + \frac{f}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} - gD \frac{\Delta E_x}{L} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^3 P}{\partial x^3 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right\} + Bgh^3 \left\{ \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right\} \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + \sigma Q + \frac{f}{2D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial y^3 \partial t} \right\} + Bgh^3 \left\{ \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right\} \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

3. モデル地形における適用

3.1 すり鉢型地形における砕波判定の検証

すり鉢地形を用いて砕波判定の検証を行った。すり鉢地形は、図-2に示すように水深 15m から 2.5m までの半周囲を斜面により囲まれた地形であり、そこに有義波高 $H_{1/3}=2.0\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=5.1\text{s}$ の一方向不規則波が入射する場合に対して砕波判定を行った。計算時間内において、砕波と判定された全ての格子点を図-3示す。これによると水深 4m 以浅で半円状に砕波が発生しているのが確認できる。また、x 方向のみの判定をしているにも関わらず、A で示す範囲で砕波判定が行われている。これは、図-4の水面波形に示すように、すり鉢地形で屈折するとはいえ、波の位相速度としては依然として入射方向 (x 正方向) に卓越した成分が支配的であるために、領域を斜めに進行する波浪に対して、x 方向成分のみの一次元的な段波によるエネルギーロスを考慮しているだけでも、鉛直圧力勾配が砕波判定値 0.7 より低下して、砕波と判定されるからである。

ただし、図-3の結果は実験による検証はなされていないが、波の主方向が砕波を考慮する計算軸方向とほぼ一致する場合には本計算手法により砕波判定が可能であることを示している。

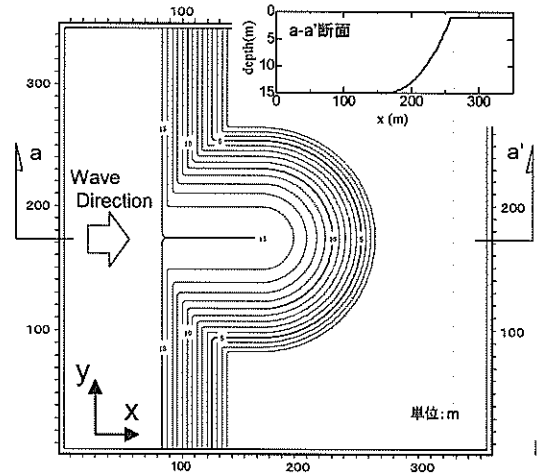


図-2 すり鉢型地形図

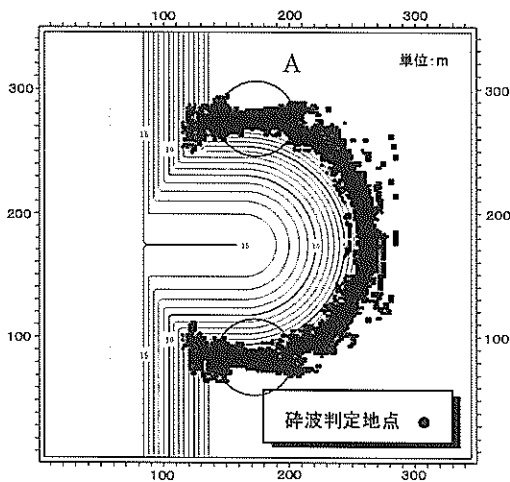


図-3 すり鉢地形上における破波判定地点の分布

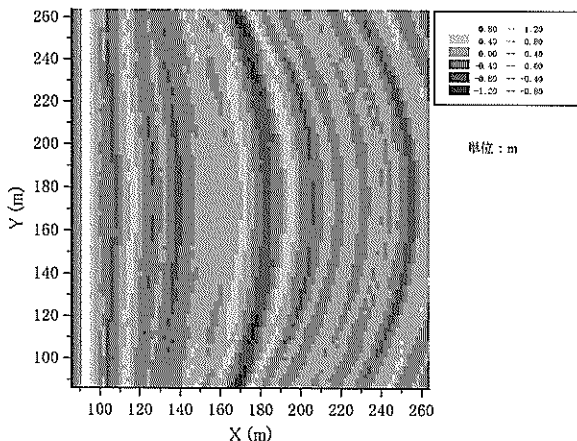


図-4 ある時刻における波面

3.2 一様勾配斜面上における波高分布特性

(1) 解析条件

本砕波モデルを一様勾配斜面地形に対して、適用性の確認を行う。計算条件については表-1に示すとおりであり、計算地形は図-5に示すように計算軸x方向に一様な斜面勾配1/30を持つように設定し、入射角を $0^\circ \sim 45^\circ$ まで変化させたときの波高の変化を検討した。なお、比較のため、既往砕波モデルとしてWatanabe et al. (1984)による運動式に拡散項を付加したモデルを用いた。

表-1 計算条件一覧

| | Type | slope | Direct | $T_{1/3}(s)$ | $H_{1/3}(m)$ | Depth(m) | H/L |
|--------|-------|-------|------------|--------------|--------------|----------|------|
| Case 1 | 既往モデル | 1/30 | 0° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |
| Case 2 | 段波モデル | 1/30 | 0° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |
| Case 3 | 既往モデル | 1/30 | 30° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |
| Case 4 | 段波モデル | 1/30 | 30° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |
| Case 5 | 既往モデル | 1/30 | 45° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |
| Case 6 | 段波モデル | 1/30 | 45° | 5.0 | 1.56 | 6.0 | 0.04 |

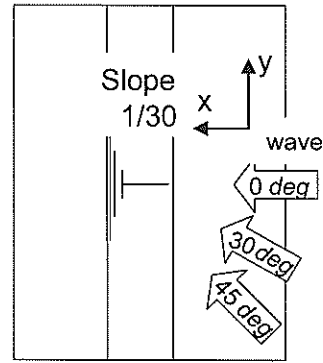


図-5 計算領域図

(2) 解析結果

図-6, 7および8に示す解析結果は、入射角を $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変化させた計算条件において、段波モデルと既往砕波モデルによる解析結果を比較したものである。

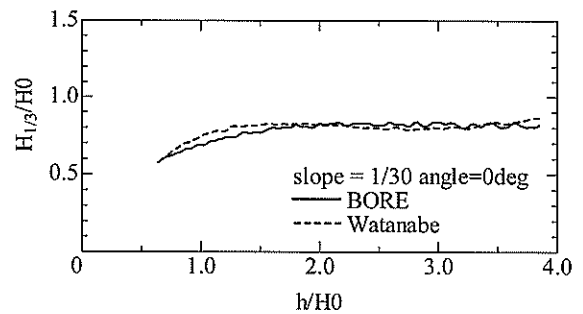


図-6 0° 入射の場合の有義波高の比較

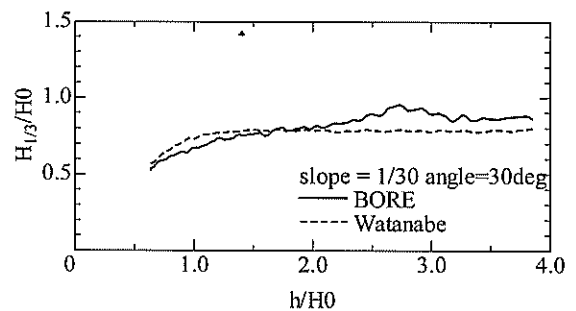


図-7 30° 入射の場合の有義波高の比較

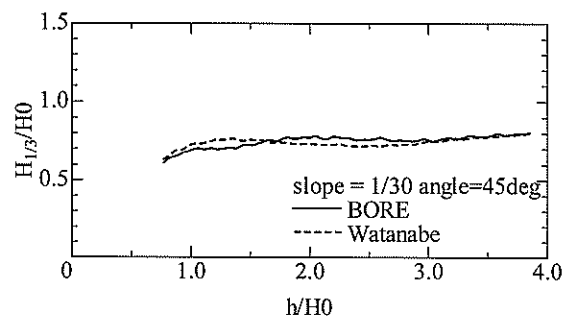


図-8 45° 入射の場合の有義波高の比較

入射角を 0° とした場合は、段波モデルおよび既往碎波モデル共に、同様な結果が得られることが確認された。さらに、入射角を変化させても、両碎波モデルの波高の差はそれほど大きく変化はしない。これは斜面上で起こる屈折変形により、波向が仮定した碎波の方向に徐々に一致して、斜面勾配に対して揃ってくるためと考えられる。ただし、一般的に波周期、水深または方向集中度により屈折の度合は変化するため、この検討のみで、本碎波モデルの妥当性を確認することはできないが、碎波する斜面勾配の方向から 30° 程度までの範囲であれば、一方向碎波の段波モデルでも近似的に適用が可能であると考えられ、それ以上の角度で波が進行する場合の碎波高の評価では、平面的な碎波減衰項を含んだ既往碎波モデルが適切で、本碎波モデルでは適用範囲外とする。

3.3 球面浅瀬地形における波高分布特性

(1) 実験概要

次に、多方向不規則波中における適用性を検討する。使用する地形は図-9 に示す球面浅瀬地形であり、多方向不規則波中における碎波特性を把握するために行われた水理模型実験(高山ら,1991)で用いた固定床模型である。

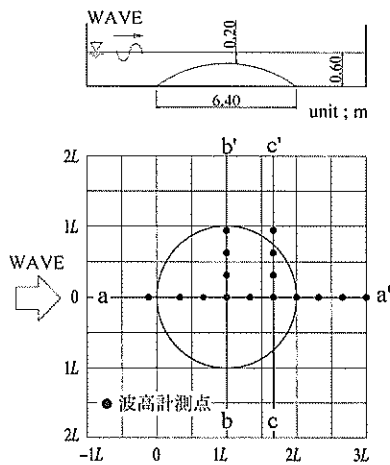


図-9 球面浅瀬地形図

浅瀬地形は水深 0.6m 、天端水深 0.2m として、半径 L (L : 波長) の範囲で球面浅瀬を形成しているものである。図-9 に示す●印は波高計測地点であり、浅瀬を中心として3測線 ($a-a'$, $b-b'$, $c-c'$) 上に配置している。また、用いた入射波条件は有義波高 0.1m 、有義波周期 1.5s として、方向集中度を変えて2ケース ($S_{\text{max}}=5$ および 75) を実施した。

(2) 解析結果

図-10 および 11 は方向集中度 $S_{\text{max}}=75$ と 5 の有義波高の平面分布である。方向集中度の違いにより、波高分布は異なり、浅瀬中央部背後においては、方向集中度が大きいほど波の収斂の度合が大きい。

これらの結果から、計測された3測線上での波高を抽出して比較したのが図-12 および 13 である。図中には、参考のため非碎波条件での結果と、 y 方向にも x 方向と同様に一次元的な段波を仮定して碎波減衰を考慮した結果を併せて示す。

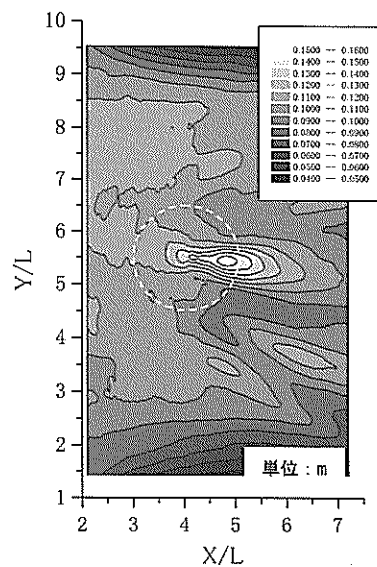


図-10 球面浅瀬地形における有義波高分布 ($S_{\text{max}}=75$)

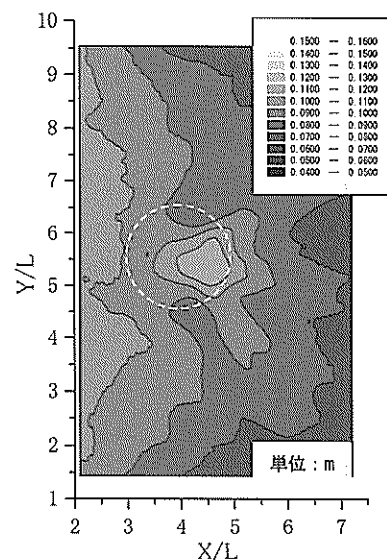


図-11 球面浅瀬地形における有義波高平面分布 ($S_{\text{max}}=5$)

入射した波は、球面地形を通過する過程で屈折し、浅瀬中央部背後に集中して砕波が発生する。図-12の a-a' 測線の結果を見ると、砕波を考慮したケースと非砕波のケースで浅瀬天端上から徐々に波高に差違が現れ、浅瀬背後では大きな波高の差となり砕波の減衰効果が表現されている。また、砕波を考慮したケースは、実験値を良く表現できている。

一方、y 方向にも段波モデルによる砕波を考慮した結果 (x-y break) においては、x 方向砕波のみの結果よりも局所的には若干波高が下回る箇所が見受けられ、y 方向における砕波減衰が行われたことが確認できるが、x 方向砕波の結果に比べて有義波高としての大きな差はない。よって、この条件における砕波は、x 方向に沿って生じており、その方向の減衰を考慮するだけで、実験値を精度良く表現出来ることが確認できる。b-b' 測線では、方向集中度によらず、計算値と実験値との差はほとんどない。また、c-c' 測線において、方向集中度が高い場合には、実験値よりも計算値は若干上回る傾向にあるが、おおむね実験値と一致している。

次に、図-13 に示す $S_{max}=5$ の結果では砕波減衰の有無に関わらず、解析値はほぼ一致しており、実験値とも良く一致している。この多方向性の強い波浪条件においては、浅瀬背後における波の収斂の度合いが小さく、実験では砕波がほとんど発生しておらず、今回の砕波条件を導入しても結果が変化していないことを示す。

なお、全体的に波高分布の左右の対称性が崩れているのは、シングルサンメーション法を用いた造波手法による波群の影響がでているものと考えられる。

4. 現地地形における適用

4.1 沖合防波堤地形における検証

(1) 実験概要

次に、沖合防波堤 (延長 900m) 周辺をモデルとした図-14 に示す地形において、防波堤前面での波高分布を測定した水理実験結果と比較する。水理実験におけるスケールは 1/100 であり、使用した波浪諸元を表-2 に示す。また、対象とする防波堤は図-15 に示す断面であり、解析で用いる防波堤反射率は、実験時に計測された反射率 0.3 を採用し、防波堤前面には任意反射境界として 7 格子分のエネルギー吸収帯を設けている。また、波高の計測地点は図-16 に示すように、防波堤幹部中央部を中心に格子状に配置波高計を配置している。

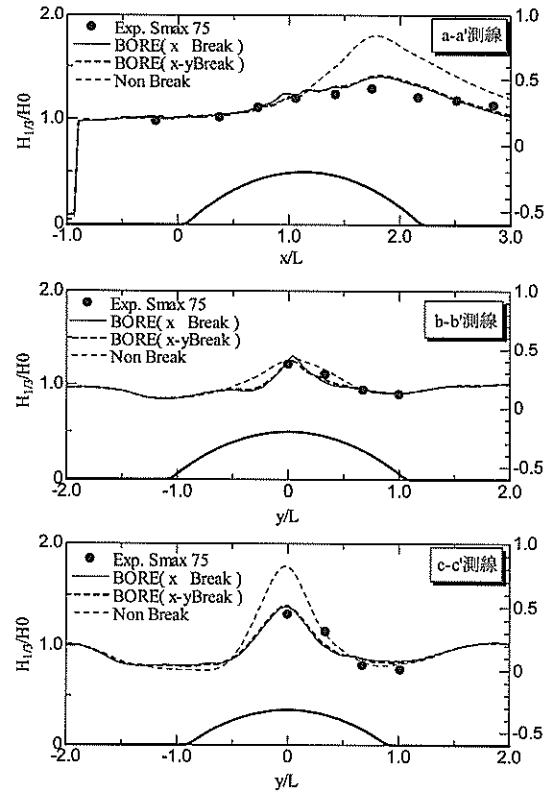


図-12 測線上における有義波高分布の比較 ($S_{max}=75$)

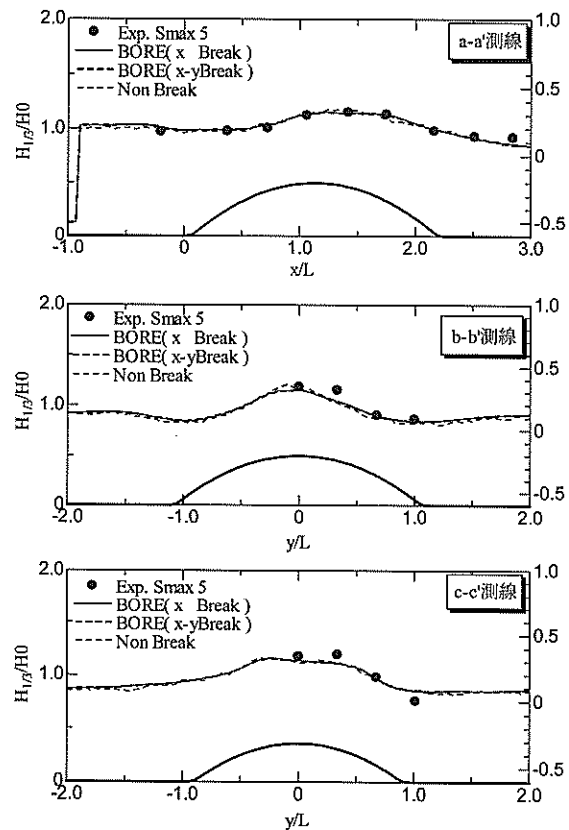


図-13 測線上における有義波高分布の比較 ($S_{max}=5$)

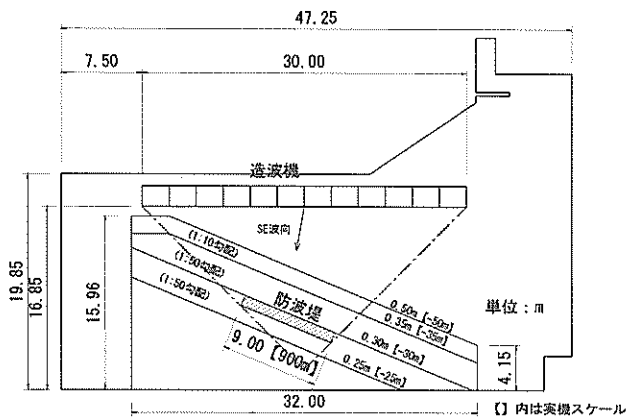


図-14 実験配置図

表-2 入力波浪諸元

| 波 向 | SE |
|-------|-------|
| 有義波高 | 12.3m |
| 有義波周期 | 14.5s |
| 方向集中度 | 10 |

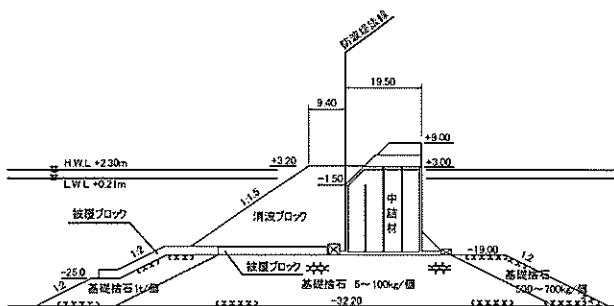


図-15 防波堤断面図

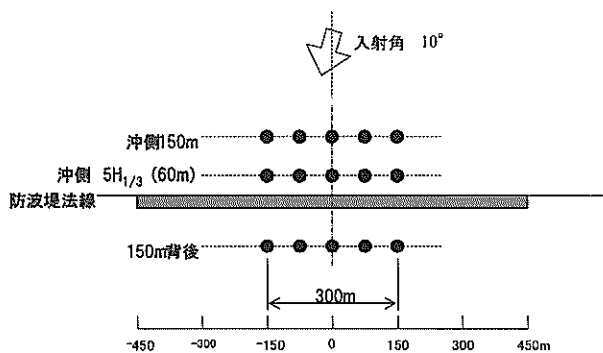


図-16 波高計配置図

(2) 解析結果

解析結果を以下に示す。図-17 は段波モデルによる有義波高の平面分布である。この結果から、実験の平行および直角方向の波高計測線毎に有義波高を比較したものが図-18 および 19 である。

図-18 は、防波堤法線方向（等水深）に、3 測線で実験値と比較したものである。沖側 150m 測線において、実験値が同一水深上において防波堤法線方向にばらついているのが確認できる。これは、この実験が消波ブロックの安定性を検討する目的で行われたものであり、形状の異なる消波ブロックを 2 区間に分けて配置している。よって、防波堤前面での波の反射率がブロックの違いにより若干異なることが原因となり、反射率を一律に設定している解析値との波高の差違となって現れている。

そして、砕波減衰に関しては、今回の解析の水深帯は、砕波が発生するのに充分浅い水深とはなっていない。よって、依然として多方向性は強く、一方向砕波とは言い難い状態で砕波減衰が行われていることになり、本砕波モデルにおける一次元的な段波として近似出来る適用範囲外となる。ただし、今回の数値解析においては、防波堤基礎マウンドを水深データとして考慮していないため、防波堤近傍における波の増大および砕波の状況が計算においては再現出来ていないため、x 方向のみの砕波であっても実験値と定性的に一致する結果となったものと考えられる。

また、背後 150m 測線上において、計算値が実験値よりも低くなっているのは、実験時に防波堤上に大きな越流が生じていたためである。図-15 に示すように防波堤模型は上部斜面堤となっており、越流を積極的に促す断面形状となっているため、波の回折成分しか考慮されていない計算値は、越流成分を含んだ実験値よりも小さな波高となる。なお、沖側 $5H_{1/3}$ の測線は計算上スポンジ層内に当たるため参考値となる。

そして、図-19 は防波堤法線に対して直角方向に対する波高分布であり、防波堤岸沖方向に対する波高分布としては、定性的には実験値と良く一致している。

以上の事から、本モデルは定性的に防波堤周辺の波高分布を示すことが出来るが、多方向性が強い堤頭部の砕波の影響量を評価するには不十分で、誤差が生じていることに留意する必要がある。

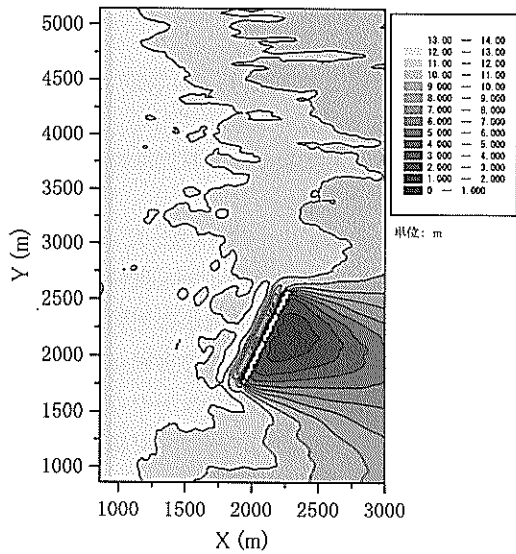


図-17 有義波高平面分布図

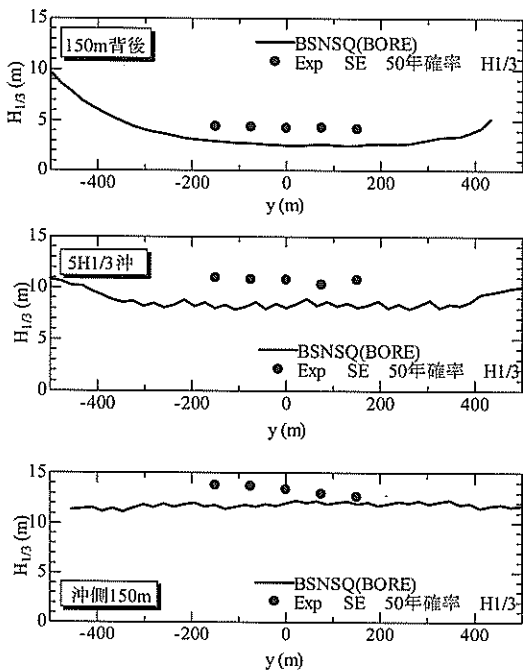


図-18 測線上における有義波高の比較

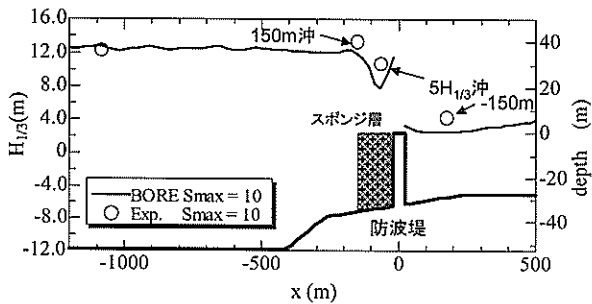


図-19 防波堤法線直角方向における波高分布

4.2 リーフ地形における検証

(1) 解析概要

次に、海底の勾配が局所的に急になり、起伏の激しいリーフ地形における波浪特性を検討した水理実験において段波モデルの適用性の検討を行う。実験で用いた地形は図-20 に示すとおりであり模型縮尺は 1/150 である。実験においてはリーフ上の主要な 5 測線上で水位変動の計測が行われており、計測された波高計の位置を▲で示す。なお、実験で用いた波浪条件は実機スケールで有義波周期 18.1s、有義波高 14.1m の一方向不規則波である。

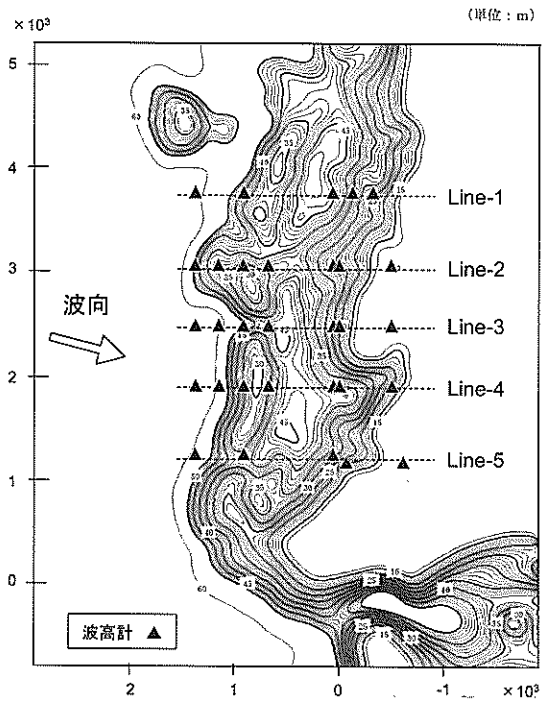


図-20 リーフ地形図 (現地スケール)

(2) 解析結果

各測線毎に段波モデルの解析値と実験値を比較したものが図-21 である。このように複雑な地形に対しては、明確な砕波の方向を定義するところが難しいため、図中には、x 方向と同様に、y 方向における砕波減衰も考慮した解析結果も合わせて示す。

Line-2 および line-3 において計算値は実験値と良い一致を示しているが、その他の line については、平面的な砕波の効果を十分にモデル化されていないため、実験値よりも波高を過小に評価している。しかし、Line-4 に示すように、岸沖方向の波高の増大、減衰に関しては定性的に表現が出来ている。ただし、 $x=-500\text{m}$ 付近の波高について波高の減衰が充分表現されていないのは、最小水深 10m としているためである。現在のブシネスクモデル (NOWT-PARI4.6 β) においては、干上がりが生じると計算

が発散するため、最小水深を設定する必要があり、水深の浅い地形効果を考慮できていないからである。

なお、砕波を考慮する減衰方向の異なる2つの解析結果においては、水深10m以浅の水深帯でそれぞれの解析結果に差が生じている。これは、計算上y方向砕波による波の減衰が発生しているということを意味し、砕波の生じる浅海域において平面的な段波を含む複雑な波浪変形が起こっていることを示す。よって、このような複雑な海底地形においては、平面的に考慮可能な砕波モデルを用いる必要があるため、一次元のみを考慮した段波モデルは、詳細な波高推定には使用できず、定性的な波高減衰の推定にのみ活用出来る。

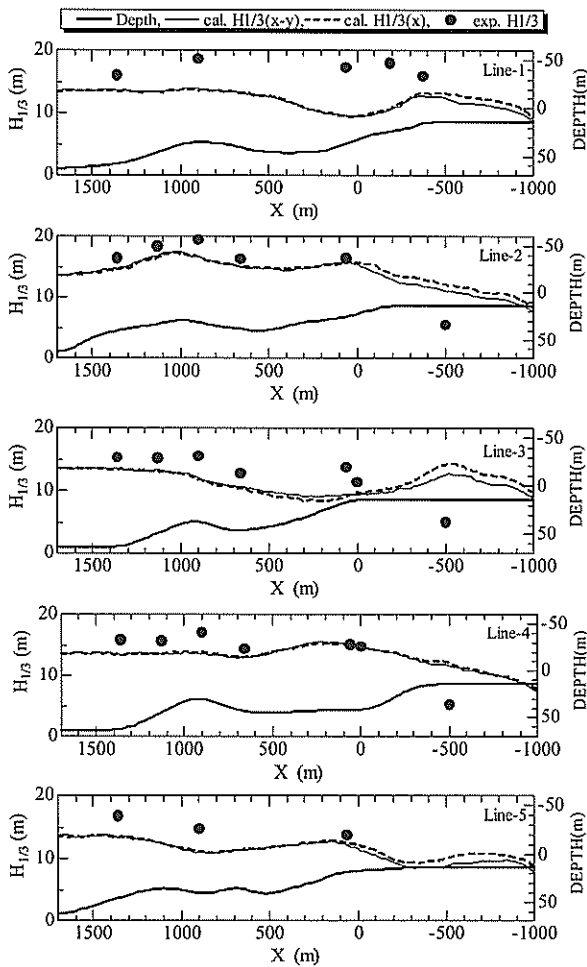


図-21 リーフ上における波高分布の比較

5. 結論

時間発展型擬似段波モデルを平面二次元計算への適用を行った。適用の際には、斜面上で発生する砕波は、波向が斜面勾配とほぼ同一方向に進行しているものと仮定し、あらかじめ斜面と計算軸が一致するように計算領域

をセットすることで、砕波減衰が一次元的な段波として近似的に扱うことが必要となる。本砕波モデルの適用性を検討した結果、以下の事柄が明らかとなった。

- ① 斜面と波向が同一方向である時には、段波モデルは既往砕波モデルと同等な結果を得られる。また、斜面上を斜めに進行する場合の砕波を考慮するには斜面との相対角が 30° 以内であれば、近似的に適応が可能である。それ以上の角度で進行する場合には、平面的な砕波を考慮できるモデルを用いる必要がある。
- ② 球面浅瀬地形に対する適用を行った結果、浅瀬背後で発生する砕波に関しては、波浪の多方向性が弱く、 $S_{max}=75$ であればx方向のみの砕波減衰であっても砕波高を、概ね表現することが可能であった。
- ③ 沖合防波堤地形のような、砕波帯よりも深い海域に設置された構造物周辺の波高分布では、砕波による波高減衰に誤差が生じており、本モデルを適用する場合には、その誤差を許容する必要がある。
- ④ リーフ地形のような、砕波方向の特定が困難となる複雑で、急勾配の地形の場合には、定性的な波高変化は表現できたが、水深10m以浅の波高分布を再現出来る結果は得られなかった。

よって、本砕波計算手法に関して適用可能な条件としては、浅海域で発生する砕波が、一次元的な段波として取り扱うことが可能な場合においてのみ適用可能である。よって、上記の仮定が困難な場合には、他の平面砕波モデルを開発する必要があるため、今後もモデルの改良を図る必要がある。

6. あとがき

今回の研究では、簡単のため地形条件や砕波の方向を限定した条件下における段波モデルの適用を図ったが、あくまで一次元的な段波で近似が成立する範囲であることが前提である。よって、段波モデルを平面砕波モデルとして汎用的に用いるためには、課題として残されている砕波判定値や砕波方向の判定等の様々な問題点を解決していく必要がある。

(2004年8月10日受付)

参考文献

- 岩垣雄一・間瀬肇・田中剛 (1981) : 不規則波の浅水変形モデルについて, 海岸工学論文集, 第 28 卷, pp. 104-108.
- 大山巧・長谷部雅伸 (2001) : 砕波による渦度供給を考慮した砕波帯内の波・流れ場のモデル化, 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp. 121-125.
- 合田良実 (1975) : 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 卷, 第 3 号, pp. 59-106.
- 後藤智明 (1984) : アーセル数が大きい場合の非線型分散波の方程式, 土木学会論文集, 第 351/II-2, pp. 193-201.
- 佐藤慎司・Michael Kabilig (1993) : Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・砕波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第 40 卷, pp. 16-20.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991) : 砕波及び反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第 30 卷, 第 1 号, pp. 21-67.
- 灘岡和夫・大野修史・栗原礼 (1996) : 波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕波実験, 海岸工学論文集, 第 43 卷, pp. 81-85.
- 平山克也 (2001) : 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1036, 162p.
- HARA, N., HIRAYAMA, K., and HIRAIISHI, T. (2003) : Application of Bore Model to Non-linear Wave Transformation, 13th ISOPE Conference, pp.796-801.
- WATANABE, A., HARA, T. and HORIKAWA, K. (1984) : Study on Breaking Condition for Compound Wave Trains, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp.71-82.
- YAMADA, H. and SHIOTANI, T. (1968) : On the Highest Water Waves of Permanent Type, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 18, Part 2, No. 135, 22p.

記号表

| | |
|------------|-------------------|
| c | : 波速 |
| D | : 全水深 |
| g | : 重力加速度 |
| h | : 静水深 |
| k | : 波数 |
| P | : x 方向の線流量フラックス |
| Q | : y 方向の線流量フラックス |
| p | : 圧力 |
| \hat{P} | : 海底面から水表面までの圧力積分 |
| \bar{u} | : 断面平均流速 |
| u_s | : 水表面流速 |
| ΔE | : 跳水によるエネルギー損失水頭 |
| η | : 水位 |
| ρ | : 水の密度 |
| L | : 波の波長 |
| B | : 分散補正係数 |
| f | : 摩擦抵抗係数 |

港湾空港技術研究所資料 No. 1090

2004. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。