

任意反射境界処理法を用いたブシネスクモデル の反射波卓越海域への適用

CALCULATION OF WAVES IN PARTIAL REFLECTION REGION USING
BOUSSINESQ TYPE WAVE TRANSFORMATION MODEL

西井康浩¹・山崎耕嗣²・吉田明徳³・山城賢⁴・青木聡⁵・吉田秀樹⁶
Yasuhiro NISHII, Kouzi YAMASAKI, Akinori YOSHIDA, Masaru YAMASHIRO
, Satoshi AOKI and Hideki YOSHIDA

¹正会員 (株)三洋コンサルタント 九州支店 (〒802-8534 北九州市小倉北区京町3-14-17)

²正会員 (株)三洋コンサルタント 下関出張所 (〒750-0067 下関市大和町1-5-7)

³正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶正会員 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術開発事務所長
(〒750-0025 下関市竹崎町4-6-1)

The applicability of a numerical model calculating waves in partial reflection region is examined. The model used in this research is a Boussinesq-type wave transformation model provided by Port and Airport Research Institute in Japan (NOWT-PARI, Ver4.6 β for short), which has a function of evaluating reflected waves at porous layer boundary. The feature of this model is that the reflected waves are reproduced without adjusting any parameters at the reflection boundaries. Experiments with a large scaling model of Nase harbor, Kagoshima prefecture, were conducted. Experimental results were compared with numerical results. Good agreements were obtained for wave height distribution.

Key Words : Boussinesq equation, NOWT-PARI Ver4.6 β , Non-linear wave transformation model,
Porous layer, Partial reflection boundary

1. はじめに

ブシネスクモデルは、さまざまな波浪変形の要素を同時に扱うことができる波動方程式のひとつである。このモデルは、海底勾配の変化に伴う屈性や浅水変形、島や外郭施設などの構造物による回折や反射が扱える。さらには碎波モデルが組み込み、多方向不規則波が扱えるため、浅海域での波を再現するツールとして実務への適用が期待される数値モデルの一つである。ただし、本来のブシネスク方程式は長波近似の方程式から出発しているため、深海域への適用には限界があること、非線形性が強く現れるところへの適用が妥当でないことが指摘される。しかし、波の弱非線形効果や弱分散性が表現できる波動方程式であるため、近年実用性の高い数値モデルとして実海域への展開が盛んに検討されている。実務問題としてこのブシネスクモデルを港口または港

内の静穏度の検討に用いるためには、島や外郭施設などの構造物の任意反射境界、側方における透過境界および造波位置での無反射境界が設定できる任意反射境界処理法の組み込みが必要である。

そこで本研究では、消波ブロックなどの消波材による波浪減衰機構を透水層としてモデル化し、波の部分反射を直接的に計算する任意反射境界処理法を提案した平山ら¹⁾のブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver4.6 β)を採用し、反射波が卓越する防波堤前面の実海域での波浪場の検証を試みた。この透水層モデルは、消波ブロックで構成される消波工の内部で生じる波浪減衰機構を消波材による層流抵抗と乱流抵抗で表現している。これらの抵抗係数は消波材の形状特性や積み方に依存し、その層厚は消波工の設置幅と同じに設定できる。修正ブシネスク方程式を用いて透水層内の波浪場を再現する場合、線流量フラックスとDupuit-Forchheimer則による透水層内の

波浪抵抗が活用できる。さらに、この透水層モデルを誘導する際に、層流抵抗からスポンジ層によるエネルギー減衰項が得られることをCruzら²⁾が示しており、これを高次型スポンジ層モデルとして、任意反射境界に適用する研究もある¹⁾。そこで今回は、透水層モデルと高次型スポンジ層モデルを任意反射境界として扱う。

本研究では、2次元水路を用いた数値計算での透水層モデルを検証し、続いて大型の水理模型実験との比較を通じて透水層モデルと高次型スポンジ層モデルの精度の検証を行った。

2. 任意反射境界のモデル

任意反射境界を表す透水層モデルと高次型スポンジ層モデルの運動方程式は、分散項に補正項を加えた修正ブシネスク方程式を基本に、透水層内へ拡張したものになっている。

ここでは、両モデルの基本方程式を紹介する。

(1) 透水層モデル

透水層の空隙率を λ とし、これに層流抵抗係数 α と乱流抵抗係数 β 、さらに慣性力係数 τ を修正ブシネスク方程式に加えた透水層内の運動方程式(x方向)が、次式(1)のように表せる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) \right\} \\ & + \varepsilon \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{P}{D} \left(1 - \lambda \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right) \\ & + \alpha \left\{ P - \mu^2 \left(\left(B + \frac{1}{2} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right\} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{h^3}{6} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right\} \right) \right\} \\ & + \varepsilon \beta \left[\left(\frac{P}{D} \right)^2 + \left(\frac{Q}{D} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. + \mu^2 h^2 \left\{ \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{D} \right) \right\}^2 \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{2}{3} \left[\frac{P}{Q} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{D} \right) \right\} \right] \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{Q}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{D} \right) \right\} \right] \right] P \right]^{1/2} \\ & = \mu^2 \left[\left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right\} \right. \\ & \quad + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ & \quad \left. + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} \right\} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

図-1に示すように透水層幅を消波工幅とほぼ同じにとり、これに空隙率などのパラメータを与えることで反射率を調整することなく波のエネルギーを減衰させる任意反射境界処理法が提案¹⁾された。

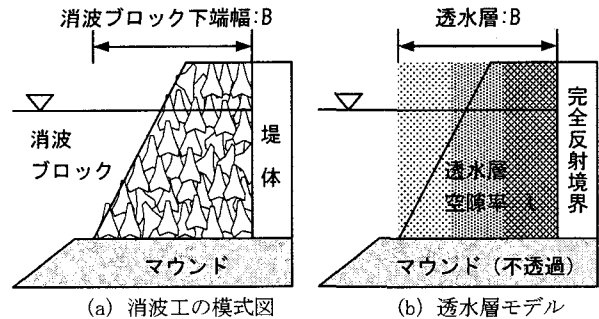


図-1 消波ブロック被覆堤における透水層モデル

ここで、マウンド部分は不透過とする。透水層の空隙率は、水域と透水層との境界で $\lambda=1$ とし、完全反射境界となる堤体壁面に近づくにつれて線形的に減少し、堤体壁面で $\lambda=\lambda_0$ となるよう次式(2)で定義している。

$$\lambda = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{x}{B} \quad (0 \leq x \leq B) \quad (2)$$

また、透水層の層流抵抗係数 α と乱流抵抗係数 β は、近藤・竹田³⁾にならうと空隙率 λ 、水の動粘性係数 ν_w 、消波ブロック代表径 d を用いて次式(3)で与えられることが分かっている。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\nu_w}{d^2}, \quad \beta = \beta_0 \frac{(1 - \lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (0 < \lambda < 1) \quad (3)$$

ここで、 α_0 と β_0 は、ブロックの積み方や形状特性により異なる定数で、実験的に求められたものである。代表的なブロックについては、近藤・竹田³⁾が表-1のようにまとめている。

表-1 代表的な消波ブロックの α_0 と β_0

固体の種類	テトラポット		六脚		中空三角	
	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積
α_0	1200	2100	19000	5000	3500	9600
β_0	1.7	2.2	7.1	3.5	2.9	4.7

(2) 高次型スポンジ層モデル

式(1)の第5項の層流抵抗項において、層流抵抗係数透水層 α の代わりにCruzら²⁾が示したエネルギー減衰係数 σ を用いて、この項をエネルギー減衰項として表すと次式(4)のように書き改められる。

(エネルギー減衰項)

$$= \sigma \left(P - \mu^2 \left(\left(B + \frac{1}{2} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right\} - \frac{h^3}{6} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right\} \right) \right) \quad (4)$$

ここに,

$$\sigma(x) = \alpha_0 \frac{r \sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh \left(\frac{rx}{F} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

$F = 2 \sim 3$ 波長, $\sigma_m = \theta \sqrt{g/h}$, $r = 3$

上記に示す高次型スポンジ層モデルは、式(1)において層流抵抗係数 α をエネルギー減衰係数 σ に置き換え、空隙率 $\lambda=1$ 、慣性係数 $\tau=1$ 、乱流抵抗係数 $\beta=0$ としたものである。つまり、このモデルは、波のエネルギーを層流抵抗のみで減衰させる透水層モデルと言える。

3. 2次元水路を用いた透水層モデルの検証

ブシネスクモデルによる2次元数値波動水路を用いて、平山ら⁴⁾が行った水理模型実験との比較を行うため、数値シミュレーションにより検証を試みた。計算に用いた数値水路は、図-2に示すように造波境界の背後に高次型スポンジ層を、波の進行方向に透水層を設けた一様水深の長水路からなり、両境界の間が計算領域となる。

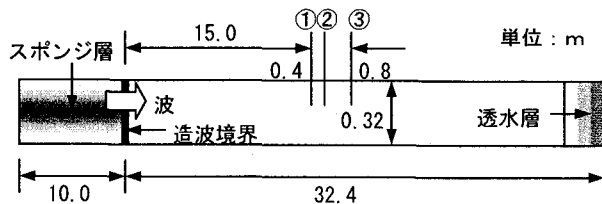


図-2 2次元数値波動水路の計算領域

(1) 実験条件

平山ら⁴⁾の実験は、長さ32.4m、水深32cmの2次元水路が用いられている。入射波諸元は波高3cm、周期0.99sec~2.82secの規則波である。消波ブロックは空隙率 λ_0 が0.45のテトラポットを用いている。

(2) 透水層による消波ブロックのモデル化

実験で用いた消波ブロック（勾配1:4/3、幅0.53m）を図-1(b)のような透水層によって表現した。ここでマウンド部は不透過とし、計算に用いる透水層幅 B は、消波ブロック法先までの幅と同じにとった。透水層の空隙率は、図-3に示すように従来から用いられている線形的な変化（Type-1）に加え、以下のような新たに2ケース（Type-2、Type-3）の変化を提案した。

Type-1：水域と透水層域の境界で $\lambda=1$ とし、壁面に近づくにつれてブロックの空隙率 λ_0 に線形的に変化する場合

Type-2：消波ブロックの設置形状と同じように、壁面近くでは空隙率 λ_0 の一定値をとり、構造物の法面が波面より下になる場所から水域と透水層域の境界で $\lambda=1$ となるよう線形的に変化する場合

Type-3：水面に近いほど流速が大きくなるという流体の運動を考慮して、底面付近に消波ブロックがある場合は空隙率が大きく、壁面に近づくにつれて空隙率 λ_0 に変化する場合

<凡例> Type-1 : ————
Type-2 : - - - - -
Type-3 :

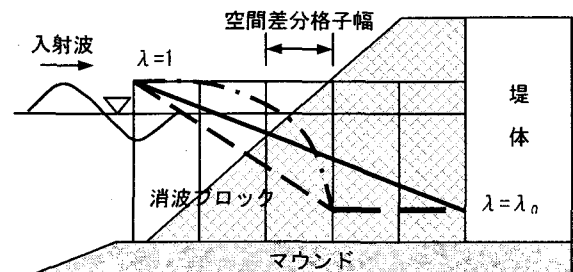


図-3 空隙率の変化

(3) 計算条件

計算には、図-2に示すように造波境界の背後に高次型スポンジ層を設け、また波の進行方向に透水層を設けた一様水深の数値水路を用いた。このとき、高次型スポンジ層と透水層の両境界の間が計算領域となる。造波境界には石井ら⁵⁾の線境界入射法を用いた。空間差分の格子間隔は $\Delta x=0.1$ m、時間差分の時間間隔は $\Delta t=0.01$ secで、造波時間は240secとし、図-2に示す①、②、③地点において0.05sec毎に水位変動 η を出力した。計算には入射波は波高0.03m、周期0.99sec~2.82secの規則波を与えた。

(4) 計算結果

計算によって得られた水面波形の時系列データから、合田ら⁶⁾の入・反射分離推定法により反射率を求めた。

図-4は空隙率 λ_0 の影響を調べるために λ_0 を0.1、0.3、0.45と変化させたときの周期の違いによる反射率の変化と、実験により得られた反射率を示したものである。このときの空隙率はType-1の変化を用いた。空隙率 λ_0 が0.45の場合をみると、周期が長いと反射率が高く、反対に周期が短くなると反射率も小さくなっている。実験結果でも同じ傾向があることから、透水層モデルは周期の違いによる反射率の変化を再現しているといえるが、その値は実験値に比べ全体的に高くなっている。

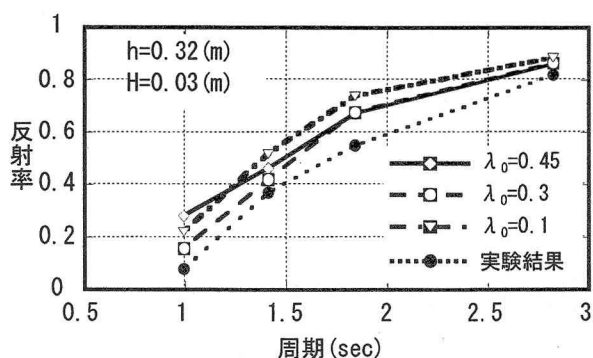


図-4 空隙率の違いによる反射率の変化

また、空隙率 λ_0 の違いを比較すると、空隙率 λ_0 が0.1と小さくなると反射率は大きくなる。この原因として、空隙率が小さくなった透水層自身で反射が生じているためと考えられる。以上の傾向は、空隙率の違いによる反射率の変化を再現しているといえる。

図-5は空隙率 λ_0 が0.45で、先に述べた空隙率変化の3ケースを用いた場合の反射率であり、Type-2の場合の反射率が実験値と近いことが分かる。

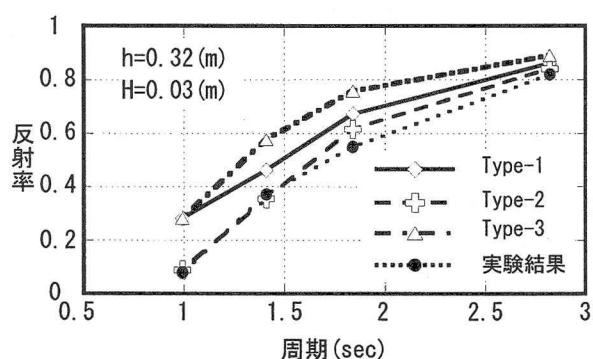


図-5 空隙率変化の影響

このことから、消波ブロック内の空隙率の変化の違いによって反射率の精度が影響を受けるということが分かった。また、Type-3の場合に反射率が大きい値を示したのは、消波ブロックの法先付近で空隙率が非常に大きくなるため、流体の透過率が高くなって抵抗を受けにくくなったためと考えられる。

3. 実海域での平面実験と数値計算

ここでは、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所が実施した鹿児島県名瀬港の水理模型実験に対して任意反射境界に透水層と高次型スポンジ層を用いた数値計算で反射波が卓越する波浪場を再現し、数値モデルの精度を確認した。

(1) 現地の状況

今回対象とした名瀬港は、図-6に示すように鹿児

島県奄美群島の最大島・奄美大島の北西部に位置し、港口部を北側の東シナ海に開く閉鎖性の高い切込み型の港湾である。また、港口部の水深は40mと深い。



図-6 名瀬港計画平面図
(鹿児島県庁港湾課HP引用, H16. 4. 10更新)

(2) 水理模型実験の方法

本実験は、名瀬港東防波堤前面海域における反射波の状況把握と反射波抑制のための対策工の評価を大水深スケールでの3次元水理模型実験を用いて検証すると同時に、大水深でかつ急峻地形に建設される東防波堤の改良に資するデータ取得を目的としたものである。実験施設は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所管轄の水理実験センターの潮流・波浪平面水槽を使って実施した。実験縮尺は、長さ縮尺1/40のフルード則を用い、各物理量をスケールダウンさせた。

実験に採用した波浪諸元(目標値)は、東防波堤前面海域の波高が2~3mのときに反射波の影響が出はじめるとの現地ヒヤリングの結果を参考に、表-3のように設定した。周期は、現地波浪観測結果より有義波高2.5mのときの卓越有義波周期7.5secを設定した。潮位は、消波工幅が短くなるときに反射波が大きくなることを考慮し、H.W.L+2.0mを採用した。ただし、入射波はN方向の一方向不規則波である。

表-3 目標とした波浪諸元

潮位	波浪諸元		
	波向	波高	周期
H.W.L+2.0m	N	$H_{1/3}=2.5\text{m}$ (模型値:6.3cm)	$T_{1/3}=7.5\text{s}$ (模型値:1.19s)

実験と計算に用いた地型は、現状(現況)と対策工1の2種で、そのときの形状は下記の通りである。

- ・現状(現況)：沖防波堤350m完成時
- ・対策工1：反射波対策の一つで、東防波堤全域と山羊島一部を消波ブロックで被覆した低反射波対策のケース

この2種の地型を図-7に示す。

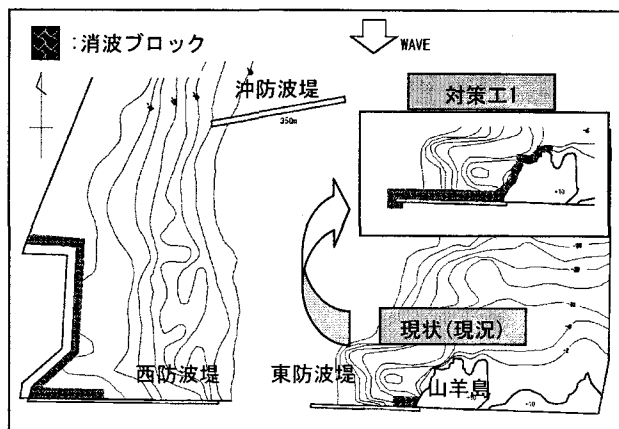


図-7 実験地型

(3) 数値計算の方法

入射波高は、水槽の沖側波高計位置に相当する箇所で、実験値と同じになるように造波境界の波高を変化させて求めた。波浪条件と計算条件は、表-4の通りである。

表-4 波浪および計算の条件

入射波高	周期	波向	Smax	潮位
2.5m	7.5s	N	150	2.0m
空間差分	時間差分	計算時間	計算領域	
5.0m	$T_{1/3}/200$	$110 \times T_{1/3}$	1,800m × 2,000m	

計算は、透水層と高次型スポンジ層を組み合わせたもの(以下、透水層モデル)と高次型スポンジ層だけのもの(以下、高次型スポンジ層モデル)で行った。計算領域と波高モニター地点を図-8に、高次型スポンジ層で表す反射率を表-5に示す。

表-5 高次型スポンジ使用時の反射率

反射境界	導波板	直立壁	消波ブロック / 消波材	ヘチマロン
Kr	1.0	0.9	0.4	0.1

(4) 実験値と計算値の比較および対策工の効果

まず反射の影響が顕著に現れる対策工1の地型において、実験値に対する透水層モデルと高次型スポンジ層の特性を、図-9にある $x=100\text{m}$ (消波ブロック被覆部)と $x=0\text{m}$ (東西防波堤開口部)の断面図に示す岸沖方向の波高分布で比較し、両モデルの精度を確認した。

これによると、実験値と両モデルの計算値は概ね一致する傾向にある。特に、両モデルの計算値は実験値に比べ、図中左端反射面の近傍で重複波の腹と節がよく再現されており、反射面から遠のくほど実験値に漸近する。ただし、開口部 $x=0\text{m}$ 断面の波高分布では、開口部沖合100m付近で計算値が若干大きくなっている。これは東防波堤および西防波堤の背後の反射境界に設置した消波カゴからの反射波の影響によるものと考えられる。

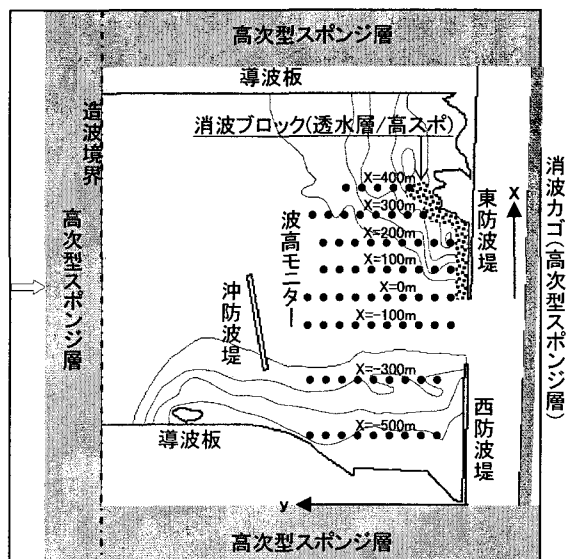


図-8 計算領域の設定

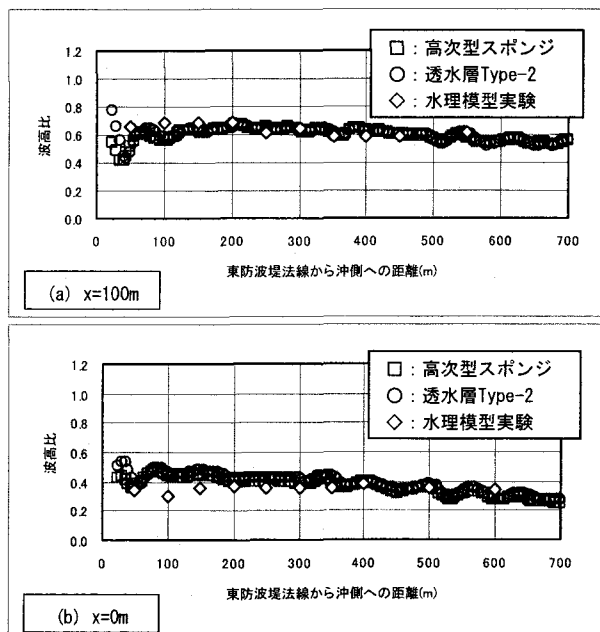


図-9 実験値と2モデルの比較

次に、透水層モデルと高次型スポンジ層モデルを比べると、反射面付近の重複波の腹の部分で透水層モデルの波高比が大きくなる傾向にあるものの、沖に向かってはほぼ同様の値を呈するようになる。これは、高次型スポンジ層の層幅が成分波の周波数に応じたエネルギー減衰を十分果たせなかったためと考えられる。

4. 数値モデルの工学的パラメータの影響

ここでは、透水層モデルを用いて実海域の計算を行う場合に、重要となる工学的パラメータの空隙率とブロックの抵抗係数がどのような影響を与えるかを調べた。

(1) 空隙率の影響

図-10は、名瀬港の模型地形を用いて空隙率の変化が波高分布に与える影響を反射面付近($y=0 \sim 200\text{m}$)で調べたものである。結果は、実験値($\diamond$)に対して、3. (2)で示した透水層内の空隙率変化を考慮した数値モデルのType-1($\square$)とType-2($\circ$)の計算値を比較したものである。

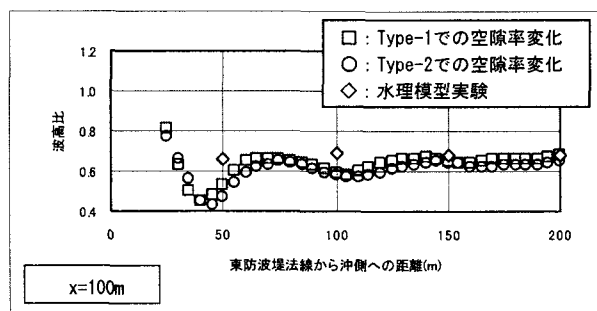


図-10 実海域での空隙率変化の影響

これによると数値モデルのType-1($\square$)とType-2($\circ$)の違いによる影響は少なく、実験値と比較しても波高比で0.1程度の差異となっている。これは、名瀬港の模型地形では、任意反射境界を設定した水深に対して透水層幅が小さいために空隙率変化の影響が出にくかったものと考えられる。

次に図-11は、実務で多用される範囲にある空隙率(0.4, 0.5, 0.6)が波高比へ与える影響を、数値モデルのType-1を使って計算で調べたものである。

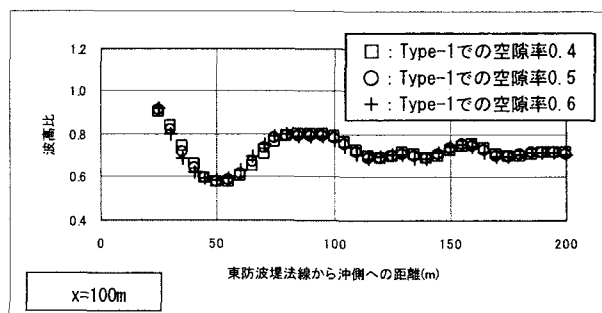


図-11 実務域で用いる空隙率の影響(Type-1)

この計算値の比較を見ると、実務で使用する空隙率の範囲内では、波高比への大きな影響が生じないことが分かる。特にこの空隙率の範囲は、エネルギー減衰効果がよく、これより空隙率が大きくなると背後の堤体直立壁からの反射が出始め、反対に空隙率が小さくなると透水層そのもので反射されやすくなるため、共に波高比が大きくなる傾向が予測される。

(2) ブロックによる抵抗係数の影響

消波ブロックが有する固有の抵抗係数の影響を計算で調べたものが図-12である。このときの抵抗係数は、近藤・竹田³⁾がまとめた表-1の値を用いた。

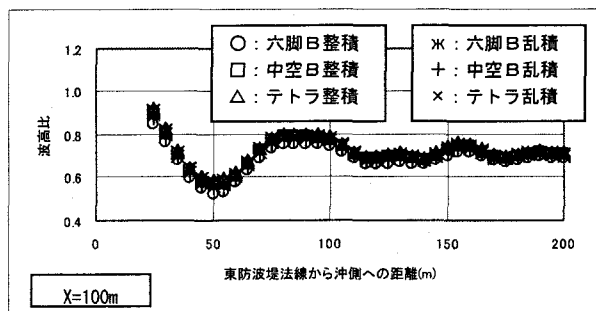


図-12 ブロックの抵抗係数の影響

図-12から、抵抗係数が大きなものほどエネルギー減衰に効果が出ていることが分かるが、その影響はブロック種別や積み方を指定するほどではない。これより、ブロックの個体差が波浪変形に与える影響は少なく、設計への自由度は大きくは損なわれないと考えられる。

5. おわりに

ブシネスクモデルを実海域に適用させるための一つの課題として、透水層を用いた任意反射境界の処理法の開発とその効果の確認がある。今回は、消波ブロックによる層流抵抗と乱流抵抗で波浪減衰を試みる平山ら²⁾のブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver4.6 β)を改良し、2次元水路ならびに平面水槽で実施された模型実験との比較を行ったところ、その再現性が良好であることが分かった。また実海域の検討では空隙率の変化があまり影響しないことから、設計実務の計算では消波ブロックの工学的な物理量をパラメータとして与えるだけで容易に境界条件を設定できることを確認した。同時に、ブロックの個体差の影響も少ないことが確認できた。

参考文献

- 1) 平山克也：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，pp.69-89，2002。
- 2) Eric Cruz，横木裕宗，磯部雅彦，渡辺晃：非線形波動方程式に対する無反射境界条件について，海岸工学論文集，第40巻，pp.46-50，1993。
- 3) 近藤徹郎，竹田英章：消波構造物，森北出版，pp.89，1983。
- 4) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発，港湾技術研究所報告，第40巻，第1号，pp.20-22，2001。
- 5) 石井敏雅，磯部雅彦，渡辺晃：非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み，海岸工学論文集，第40巻，pp.31-35，1993。
- 6) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技術研究所資料，No.248，pp.24，1976。