

ブシネスクモデルにおける目標反射率の設定法と その港内波高分布計算に対する適用性

平 山 克 也*・平 石 哲 也**

スポンジ層によるエネルギー減衰を利用した部分反射境界を対象として、入射波の非線形性と分散性、およびスポンジ層の諸元に着目した系統的な数値実験を実施し、目標反射率を設定する際の目安となる図表を作成した。特に高次型スポンジ層による部分反射境界の反射率は、入射波長とスポンジ層幅の比（相対幅）と良い相関があることが確認された。さらに、消波ブロック被覆堤を対象として計算された波の反射特性を模型実験により検証するとともに、屈折系と回折系の波浪変形が同時に生じるモデル港湾を対象とした港内波高分布計算を実施し、エネルギー平衡方程式法および高山法を用いた計算結果との違いを検討した。

1. ま え が き

ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法を実務へ適用する際には、港湾・海岸構造物や自然地形の反射率を、波浪条件に応じて任意に設定できることが不可欠である。構造物において所定の反射率を得るために、開境界処理に用いられるスポンジ層による波エネルギー減衰量を調整する方法が提案されている（例えば、有川・磯部, 1999）。また平石ら（2000）は、波長の $1/4 \sim 1/6$ 程度の幅のスポンジ層を岩礁からなる陸域境界に配置し、潮位や入射波の周期に応じてエネルギー吸収係数を調整して、それらの目標反射率 $K_r = 0.5$ を実現した。しかしながら、目標反射率を得るスポンジ層の諸元は試行錯誤によって決定されるため、異なる波浪条件や反射率に対する適用性については不明である。そこで本研究では、従来型スポンジ層（平石ら, 1995）および高次型スポンジ層（平山, 2001）によるエネルギー減衰を利用した部分反射境界を対象として、入射波の非線形性と分散性に着目した系統的な数値実験を実施し、波浪条件やスポンジ層の諸元によって変化する目標反射率を設定する際の目安となる図表を作成した。さらに、消波ブロック被覆堤に対して設定した部分反射境界の反射計算特性を模型実験結果を用いて検証するとともに、屈折系と回折系の波浪変形が同時に生じるモデル港湾を対象にブシネスクモデルによる港内波高分布計算を実施し、エネルギー平衡方程式法および高山法を用いた計算結果との違いを検討した。

2. スポンジ層の反射率に関する感度分析

スポンジ層による波エネルギー減衰量は、スポンジ層の幅 F とエネルギー減衰係数 $\sigma(x)$ 、およびスポンジ層に入射する波浪条件によって決まると考えられる。そこで、これらの変量と波の反射率との関係を明らかにするために、一次元数値水路の岸側に設置されたスポンジ層の反

射率に関する感度分析を行った。なお、スポンジ層内のエネルギー減衰係数の分布関数は Cruz ら（1993）による式（1）とし、その強度 θ を感度分析の変量とした。また、スポンジ層背後は完全反射境界とし、沖側は十分な消波性能を有するスポンジ層による吸収造波境界とした。

$$\sigma(x) = \theta \frac{r\sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh\left(\frac{rx}{F}\right) - 1 \right] \cdots \cdots (1)$$
$$F = 2 \sim 3 \text{ 波長}, \quad \sigma_m = \sqrt{g/h}, \quad r = 3$$

感度分析に用いた計算条件は次のようである。水深は $h = 10 \text{ m}$ 一定とし、造波境界から岸側スポンジ層の沖側端までの距離は 320 m とした。岸側のスポンジ層の幅 F とその強度 θ はそれぞれ、 $F = 10 \sim 80 \text{ m}$ 、 $\theta = 1.0, 2.0, 4.0$ とした。入射波浪は規則波とし次のように与えた。周期 T は、水深波長比 h/L とスポンジ層の相対幅 F/L がそれぞれ変化するように、 $T = 3.3 \sim 20.5 \text{ s}$ とした。また波高 H は、波の非線形性による影響を検討するために、合田（1983）による波の非線形性の程度を表すパラメータがそれぞれ $\Pi = 0.02$ と $\Pi = 0.04$ となるように与えた。前者は入射波が微小振幅波理論の適用範囲にあることを示し、後者は波高に関して有限振幅波の適用範囲にあることを示す。なお、差分格子間隔は $\Delta x = 1.0 \text{ m}$ 、差分時間間隔は $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ とし、岸側のスポンジ層による反射率は、入射波スペクトル分離法により推定した。

（1）従来型スポンジ層の反射特性

平石ら（1995）は、ブシネスクモデルの開境界にスポンジ層を配置し、線流量フラックス P, Q をエネルギー減衰係数（式（1））によって減衰させる項（式（2））を運動方程式に付加することにより無反射境界を実現した。

$$\begin{cases} \sigma(x)P & (x \text{ 方向}) \\ \sigma(y)Q & (y \text{ 方向}) \end{cases} \cdots \cdots (2)$$

本研究では、これを従来型スポンジ層と呼ぶことにする。そこで、一次元数値水路の岸側に従来型スポンジ層を設定した場合の感度分析結果を図-1 に示す。図-1 (a)～(c) はエネルギー減衰係数の強度の違いを示し、下方ほど θ 値が大きくなっている。また、左側の列が $\Pi =$

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

** 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

0.02とした場合、右側の列が $\Pi=0.04$ とした場合である。それぞれの図では、横軸に水深波長比 h/L を、縦軸にスポンジ層の幅と水深の比 F/h をとり、そのときに得られた反射率が0.1刻みで示した。また、図中には、スポンジ層の相対幅 F/L の等値線が0.5刻みで描かれている。

非線形性の程度の違いを表す図-1(a)~(c)の左右の列を比較すると、 θ 値に関わらず、両者は非常によく似ていることがわかる。 $\theta=1.0$ としたとき、別に実施した $\Pi=0.10$ (このとき、波速に関しても有限振幅波の性質が現れるようになる)の場合でも、反射率の分布に変化はみられなかった。したがって、スポンジ層による波のエネルギー減衰や反射の程度に関して、入射波が有する非線形性の影響は無視できると考えられる。

スポンジ層の相対幅を長くすると反射率が低減されることは、スポンジ層の幅と入射波の波長の幾何学的な関係から直感的に理解される。 θ 値が大きい図-1(c)では、 F/L が大きくなる右上ほど反射率が低減している。また

同図では、 $F/L=0.5$ の等値線に沿って、水深波長比 h/L に関わらず、スポンジ層による反射率がほぼ0.2~0.3となっていることがわかる。一方、 θ 値が小さい図-1(a)、(b)では、予想に反して、 F/L 値の増加が必ずしも反射率の低減効果を発揮せず、むしろ水深波長比 h/L の増加に伴い反射率が大きくなる傾向が窺える。これは、エネルギー減衰項(式(2))において、波の分散効果が考慮されていないためであると考えられる。浅海波や深海波に対するエネルギー減衰効率を向上させるためには、前述のように θ 値を大きくすればよい。しかし、長波に対しては、スポンジ層自身で反射波が生じるようになる。

(2) 高次型スポンジ層の反射特性

従来型スポンジ層によるエネルギー減衰量は、入射波の分散特性に大きく依存する。一方、平山(2001)は、透水層内で成り立つ修正ブシネスク方程式において、透水層内の層流抵抗項がスポンジ層内のエネルギー減衰項と形式的に似ていることに着目して、層流抵抗係数 α の代わりに式(1)のエネルギー減衰係数 $\sigma(x)$ を用い、次式に示す高次エネルギー減衰項を得た。式(3a)、(3b)の第1項は従来のエネルギー減衰項であり、第2項は圧力分布の補正項として残された高次項である。水深波長比を表す振動パラメータ μ からわかるように、この第2項は分散項と同じオーダーで運動方程式に作用する。本研究では、これを高次型スポンジ層と呼ぶことにする。そこで図-1と同じ手法を用いて、数値水路の岸側に高次型スポンジ層を設定して行った感度分析結果を図-2に示す。

x 方向:

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

y 方向:

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

ここで、分散項の補正係数 $B=1/15$ 。

非線形性の程度の違いを表す図-2(a)~(c)の左右の列を比較すると、従来型の場合と同様に、 θ 値に関わらず両者は非常によく一致しており、高次型スポンジ層でも入射波の非線形性による反射率の違いはみられない。一方、高次型スポンジ層の相対幅と反射率は、いずれの θ 値においても入射波の分散特性とほぼ無関係に、非常によく対応している。特に、両者の相関は $\theta=2.0$ のとき最

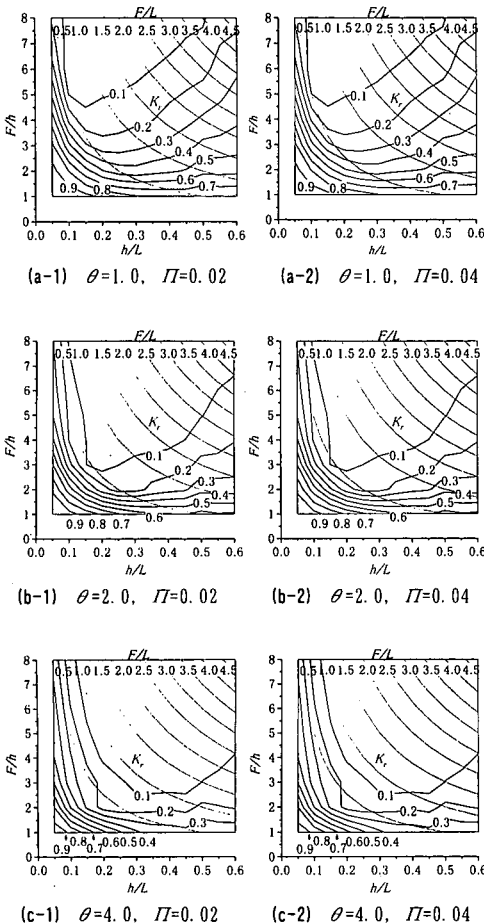


図-1 従来型スポンジ層の反射率に関する感度分析

も高く、このときのスポンジ層の反射率は、相対幅が長いほど小さくなるという直感的な理解とよく一致する。このような特性は、部分反射境界を用いた反射計算において目標反射率の設定を容易にするだけでなく、広い周波数帯を有する不規則波の反射率を、従来型よりも妥当に設定することが可能になる。しかし、スポンジ層内の波エネルギー減衰機構は実際の消波機構を忠実にモデル化したものではないので、現地の消波構造物による波の反射特性まで十分に再現することは難しいと思われる。

(3) 部分反射境界における目標反射率の設定法

開境界や海浜などに設定されたスポンジ層の反射率をゼロとするためには、スポンジ層の相対幅を十分長くすればよい。しかしながら、計算負荷の増大を極力避けるためには、最適なスポンジ層の幅 F を知る必要がある。また、入射波条件や、防波堤や護岸の構造形式に応じた反射率の概略値を再現するためには、スポンジ層の幅や強度を適切に設定する必要がある。

まず、従来型スポンジ層を用いて目標反射率を設定す

る場合には、入射波の分散特性に応じてスポンジ層の強度 θ と幅 F を調整する。 $\theta=1.0$ とした図-1(a)では、ある F/h 値に対するスポンジ層の反射率は、入射波の水深波長比 h/L に関して極小値をとり、これより大きい h/L 値では波の分散効果のために、また、小さい h/L 値ではスポンジ層の相対幅が短くなるために、それぞれ増加する傾向がみられる。したがって、例えば $h/L \leq 0.2 \sim 0.3$ 程度の浅海波に対して無反射境界を実現する最適な相対幅は、概ね $F/L \geq 1.0 \sim 2.0$ と見積もられる。一方、 $\theta=4.0$ とした図-1(c)では、水深波長比 $h/L \leq 0.5 \sim 0.6$ 程度の長波から深海波に対して無反射境界を実現するスポンジ層の最適な相対幅は、概ね $F/L \geq 1.5 \sim 2.0$ と見積もられる。

また、目標反射率を得るスポンジ層の幅 F は次のように設定する。すなわち、水深と入射波長が既知であるとき、 θ 値が異なる図-1の各図において、所定の反射率となる F/L 値を読み取り、対象とした入射波の波長を用いて適切なスポンジ層の幅 F を算定する。この幅 F の値は、護岸のように背後に陸域が広がり、スポンジ層を自由に設定できる場合にはあまり問題にならない。しかし離岸堤などのように、陸域の幅が十分に確保されていない場合には、その前面の水域をスポンジ層とせざるを得ず、その周辺の波浪場の計算結果に少なからず影響を及ぼすものと考えられる。したがって部分反射境界におけるスポンジ層の幅は、目標反射率を満足する限り、できるだけ現地の消波工の設置幅に近づけることが望ましい。

一方、高次型スポンジ層を用いて目標反射率を設定する場合には、式(1)のエネルギー減衰係数に対して $\theta=2.0$ と設定し、スポンジ層の幅 F のみを調整する。図-2(b)では、ある相対幅 F/L に対して得られるスポンジ層の反射率は、入射波の h/L 値に関係なくほぼ一定であるので、例えば $F/L=0.5$ としたときに得られる反射率は、ほぼ $K_r=0.2$ となることがわかる。なお、図-1および図-2においては、 F/L 値は縦軸と横軸に関する逆比例曲線となっているので、必要に応じて F/L 値曲線を引き足すことにより、その他の目標反射率に対する F/L 値を得ることができる。

3. 部分反射境界を用いた波浪変形計算

ブシネスクモデルを用いた港内外の波浪変形計算では、防波堤や護岸などによる波の反射率をよく再現する部分反射境界を設定する必要がある。ここでは、前述の高次型スポンジ層を用いた部分反射境界の適用性を検討する。

(1) 消波ブロック被覆堤に対する波の反射計算

消波ブロック被覆堤に対して設定した部分反射境界における反射率の再現性について、断面水路における水理

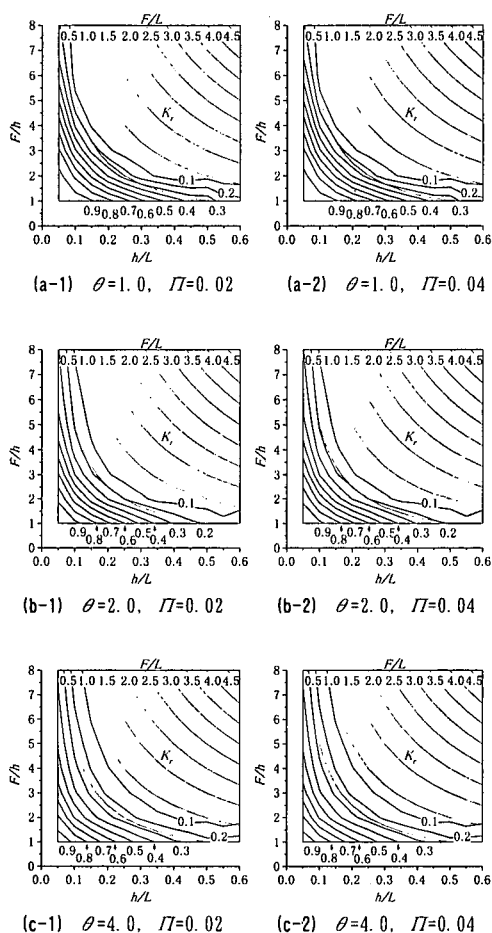


図-2 高次型スポンジ層の反射率に関する感度分析

模型実験結果を用いて検証した。波の反射に関する模型実験は、図-3に示す長さ35mの不規則波造波水路(吸収造波機能付き)に、長さ12mの1/30勾配斜面と長さ4mの水平床を設け、岸側端に縮尺1/50の消波ブロック被覆堤を設置して実施した。水位変動の計測は図中に示す地点に設置された容量式波高計によって行い、反射率の推定には入射波スペクトル分離法を用いた。一方、数値計算は、高次エネルギー減衰項が付加された断面1次元のブシネスクモデルを用いて行った。差分条件は $\Delta x=0.1\text{ m}$ 、 $\Delta t=0.01\text{ s}$ である。計算領域の沖側には吸収造波境界を、岸側端には強度 $\theta=2.0$ の高次型スポンジ層による部分反射境界をそれぞれ設定した。スポンジ層の幅 F は、目標反射率を与えられる場合には図-2(b)を参考に容易に設定することができる。しかし、模型実験に対する再現性を検討するために、ここでは模型実験における消波工の設置幅と同じ $F=0.5\text{ m}$ とした。これは入射波に対する反射波の幾何学的な位相関係を相似していると考えられる。なお部分反射境界による波の反射率は、模型実験に対応した計算格子で出力された水位変動時系列データを用いて、模型実験と同様な手法により算定した。

模型実験および数値計算に用いた入射波は、水深27.9cmの消波工前面において、波高 $H=3\text{ cm}$ または 8 cm 、

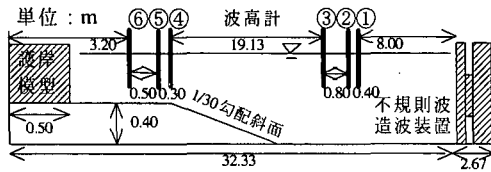


図-3 35 m 不規則波造波装置と模型・波高計の配置

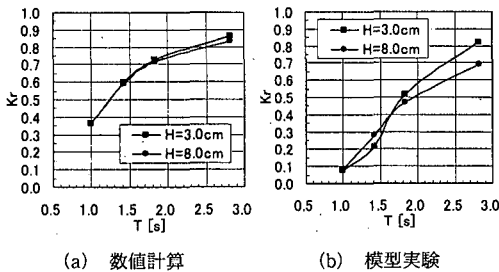


図-4 高次型スポンジ層と消波ブロック被覆堤の反射率

周期 $T=0.99\sim 2.82\text{ s}$ となる規則波である。これらより算定される前述の非線形性パラメータは $\Pi=0.03\sim 0.30$ となることから、消波工には、少なくとも波高に関して微小振幅波の適用範囲外となる波が作用していることがわかる。

波高と周期が異なる入射波に対する反射率の違いについて、数値計算結果を図-4(a)に、模型実験結果を図-4(b)に示す。スポンジ層による反射率は、周期の増加とともに増加するものの、波高の違いによる反射率の変化はほとんどみられない。これらは図-2(b)の感度分析結果とよく一致する。すなわち、スポンジ層の幅 F と水深 h 、およびそれらの比 F/h は一定(≈ 1.8)であるので、周期が増加すると、水深波長比 h/L および相対幅 F/L はともに小さくなる。このとき読み取るべき反射率は各図の左下隅のほうへ移動する。また、波高の違いによる反射率の変化がみられないことは、非線形パラメータ Π によって感度分析結果に違いがみられないことに対応している。

一方、模型実験で得られた反射率は、周期 $T=2.82\text{ s}$ のとき数値計算結果と概ね一致している。しかし、それより短い周期の波による反射率は数値計算と大きく異なり、消波工によって十分消波されていることがわかる。また、波高の違いにより異なる反射率が観測されることも数値計算や感度分析の結果と大きく異なる点である。数値計算でこれらを再現するためには、波浪条件ごとにそれぞれ適切なスポンジ層の幅 F を設定するか、消波工内の波浪減衰過程を物理的に考慮した他の反射境界処理法(例えば、平山, 2001)を用いる必要があると思われる。

(2) モデル港湾における波高分布計算

波の回折と反射、および屈折と浅水変形が同時に生じるモデル港湾を対象に、消波構造物による波の部分反射を考慮した波浪変形計算を実施し、エネルギー平衡方程式および高山法による算定結果との違いを検討した。

モデル港湾とその周辺の海底地形を図-5に示す。海岸線に平行な等深線(勾配1/50)が続く海浜地形に、航路と水深-12m、-6mのバースや泊地が整備されていることを想定した。また入射波浪は、有義波高1.0m、有義波周期10s、主波向 0° 、 $S_{\max}=25$ の多方向不規則波とした。

ブシネスクモデルでは、港内外の防波堤・護岸前面と

表-1 モデル港湾に対する計算条件一覧

計算法	入射境界	入射波条件 (多方向不規則波)							差分条件		境界条件	
		$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	θ_p	$S_{\max}$	N_s	N_{df}	N_{ao}	Δx	Δt	碎波	その他
エネルギー平衡方程式法	水深15m(沖側境界)	1.0m	10.0s	0°	25	—	10	24	5m	—	なし	入射波高と反射波高の合成
高山法	水深12m(港口部)	0.48m	10.1s	-29°	75	—	10	16	25m	—	なし	代表水深:-12m, 反射次数:2
ブシネスクモデル	水深15m(沖側境界)	1.0m	10.0s	0°	25	512	—	—	5m	0.25s	なし	スポンジ層による透過, 部分反射

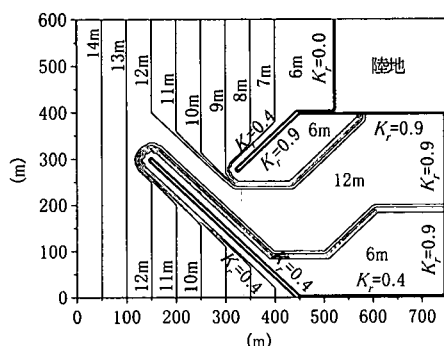


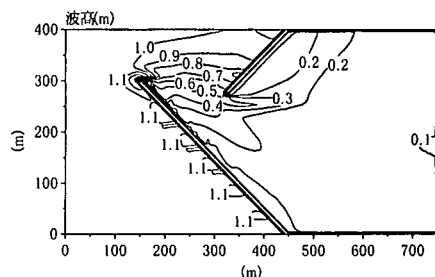
図-5 モデル港湾の港形と海底地形

開境界に高次型スポンジ層 ($\theta=2.0$) を設置した。またスポンジ層の幅 F は、図-2(b) を参照し、開境界 ($K_r=0$) では $F/L=2.0$ とした。また、防波堤・護岸に対する部分反射境界 ($K_r=0.4, 0.9$) の反射率は、簡便のために $K_r=0.5, 1.0$ とみなし、それぞれ $F/L=0.2, 0.0$ とした。入射波条件とそれぞれの計算法に対する計算条件を表-1 に示す。

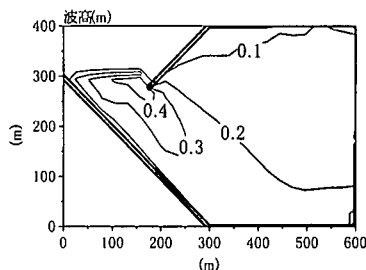
エネルギー平衡方程式法、高山法、およびブシネスクモデルによって計算された港内外の波高分布を図-6 (a), (b) および (c) に示す。エネルギー平衡方程式法 (a) では、主防波堤堤頭部における波高の増大や港内の浅瀬 (水深-6 m) による波の屈折が計算され、主防波堤による波の回折も本計算では適度に計算されている。また、港内波高分布のみ計算された高山法 (b) では、主・副防波堤による波の回折が計算されている。しかし浅瀬による波の屈折は計算されていない。一方、ブシネスクモデルで算定された港内の波高分布 (c) は、これらの計算法で得られた波浪変形を再現しているものの、港内波高はかなり静穏である。これは、消波工の空間分布を表現したスポンジ層により、消波工に沿って伝搬する波浪の減衰が考慮されたためである。部分反射波を線境界で与える (a), (b) ではこのような沿い波の減衰は計算されない。

4. おわりに

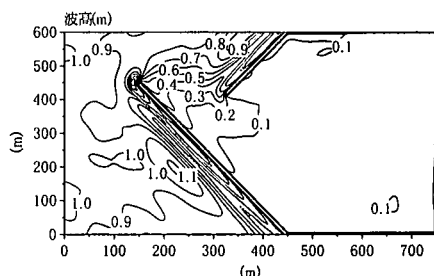
本研究では、従来型および高次型スポンジ層を用いた部分反射境界における目標反射率の設定方法を明らかにした。特に、入射波の分散特性に関わらずスポンジ層の相対幅と高い相関を示す反射率が得られる高次型スポンジ層は、消波構造物を有する現地港湾を対象とした波浪変形計算の精度向上に役立つことが示された。



(a) エネルギー平衡方程式法による計算結果



(b) 高山法による計算結果



(c) ブシネスクモデルによる計算結果

図-6 モデル港湾における港内外の波高分布

参考文献

- 有川太郎・磯部雅彦 (1999): 非線形緩勾配方程式を用いた任意反射率を持つ構造物周辺の入・反射波浪共存場の解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 56-60.
- Eric Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 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.
- 合田良実 (1983): 波浪の非線形性とその記述パラメーター, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 39-43.
- 平石哲也・上原 功・鈴木康正 (1995): ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性, 港研資料, No. 814, 22 p.
- 平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功 (2000): 熊本県竜ヶ岳町における台風 9918 号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 306-310.
- 平山克也 (2001): ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 26-30.