

# 消波構造物に作用する波浪の消波機構を考慮した 港内波浪変形計算

平山 克也\*・上原 功\*\*

波の非線形性と分散性を考慮し, かつ屈折系と回折系の波浪変形を同時に解くことができるブシネスクモデルにおいて, 消波構造物における波浪減衰過程を物理的に捉え, ささまざまな波浪条件に対する波の反射特性を自動的に再現する任意反射境界が開発されている。一方, 砕波による波浪減衰と汀線での波の遡上や反射をスポンジ層で表現した海岸モデルは, 砕波形態によって変化する海浜地形での波の反射率をほぼ妥当に再現することができる。これらを現地港湾へ適用した波浪変形計算では, 模型実験結果をよく再現するとともに, 消波構造物や海浜地形において風波と長周期波の反射率の違いを明瞭に示す計算結果が得られた。

## 1. ま え が き

数値計算によって港内の波高分布を算定する場合, 消波構造物境界では, 一般に実機の構造形式や波浪条件をもとに推定された反射率の概略値が設定される。

近年では, 波の非線形性と分散性を考慮し, かつ屈折系と回折系の波浪変形を同時に解くことができるブシネスク方程式を用いた波浪変形計算を, 現地港湾に適用する試みがなされている (例えば, 喜岡ら, 1996; 平石ら, 2000)。しかしながら, これらの研究で行われた波の反射計算は, 透水層やスポンジ層を設置した部分反射境界においてそれらの摩擦抵抗を調整し, 予め設定された反射率を再現するものであり, 消波構造物の種類や形状, 地形条件, あるいは入射波の諸元によって変化する現実の反射率を再現するまでには至っていない。

一方, ブシネスクモデルにおいて, 反射境界で生じる反射波の振幅と位相を客観的に計算するために, 消波構造物における波浪減衰過程を物理的に捉え, ささまざまな波浪条件に対する波の反射特性を自動的に再現できる任意反射境界が開発されている (平山, 2001a)。そこで本研究では, このモデルを消波構造物や海浜で囲まれた M 港における港内波浪変形計算に適用し, 風波に対する計算精度を別途行われた模型実験結果によって検証した。さらに, 長周期波に対する港内波浪変形計算を合わせて実施して, 風波のときと同じ計算モデルを用いて, 消波構造物や海浜における長周期波の反射特性と港内波高の分布特性を同様に検討できることを示した。

## 2. 波浪の減衰機構を考慮した波浪変形計算法

### (1) 計算モデルの概要

計算対象とした M 港は港内の水深変化が大きく, 消波された防波堤や護岸による回折変形や部分反射と同時に, 港内において屈折, 浅水変形, 砕波が生じると予想される。これらの計算に, 本研究では透水層内へ拡張し

た平面 2 次元の修正ブシネスク方程式を用いた (平山・平石, 2001)。この式は,  $\lambda=1$  とすると Madsen・Sørensen (1992) が導いた修正ブシネスク方程式と等しくなる。また, 後述する任意反射境界では,  $0 < \lambda < 1$  となる消波工内部で透水層による層流抵抗と乱流抵抗が作用し, 波浪条件に応じた波浪減衰や, 消波工や堤体壁面による波の反射が自動的に計算される。したがって, これを基礎方程式としたブシネスクモデルでは, 消波工の有無に関わらず統一的な数値計算が可能である。なお, 線流量フラックス表示された本モデルは, 堤体壁面において連続式を厳密に満足することができる。

一方, 計算領域周囲の開境界には, 入射波の水深波長比が大きい場合にも効率よく波エネルギーが減衰する高次型スポンジ層 (平山, 2001a) を設置した。スポンジ層におけるエネルギー減衰項が, 形式上, 透水層による層流抵抗項に等しいことを利用して, それぞれ,  $\lambda=1$ ,  $\alpha=\sigma$ ,  $\beta=0$ , と設定すると, 開境界における波浪減衰も消波工内外の水域と同様に計算することができる。ここで, エネルギー減衰係数  $\sigma$  には, 次式で表される双曲線型関数を用いた。

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

なお, 高次型スポンジ層をあえて物理的に解釈すると, これは, 層流抵抗のみが次第に増大する空隙率 100% の透水層として理解される。

沖側の入射境界は, 平山ら (2000) が用いた線境界入射法による吸収造波境界とした。また砕波モデルには, 流速波速比によって砕波を判定し, 渦動粘性によって砕波後の波浪減衰を計算する方法を用いた。底面の摩擦抵抗は  $f=0.02$  とした摩擦係数によって表現したが, 海浜の汀線近傍の遡上境界は設けず, 代わりに, 後述する海岸モデルによって, 海浜地形における波浪減衰と波の反射を表現した。

### (2) 任意反射境界における反射波の計算法

透水層内の係数群は消波構造物を構成する物理量によって次のように一義的に決定される。例えば, 消波ブ

ロック被覆堤に対して設定される透水層の空隙率 $\lambda$ は、堤体面からの距離を $x$ 、消波工の設置幅を $B$ 、消波工の空隙率を $\lambda_0$ とすると、法面勾配を考慮して式(2)で与えられる。また、消波工内の層流および乱流抵抗係数 $\alpha$ 、 $\beta$ は、消波材の形状や積み方を表す定数 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ や代表径 $d$ 、および水の動粘性係数 $\nu_w$ を用いて式(3)で与えられる。

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

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

したがって、消波構造物に対して任意反射境界を設定するためには、消波工の設置位置において、それぞれの消波工の諸元と透水層の空隙率 $\lambda$ を与えればよい。なお、その他の計算領域では $\lambda=1$ とする。このとき、透水層における抵抗係数は式(3)からそれぞれ $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ となる。

このように設定された任意反射境界の内部では、その他の計算領域における屈折や回折などの波浪変形と同様に、数値計算上の特別な操作を何ら行うことなく、透水層内を伝搬する過程で減衰した入射波が、堤体壁面で完全反射し、消波工内部や堤体壁面で生じた反射波は透水層を通過する過程で再び減衰しながら沖へ向かうという実際の波の反射プロセスが忠実に再現される。

平山(2001b)は、消波ブロック被覆堤や消波材を充填した直立消波堤を対象とした波の反射計算を行い、反射波の波形や反射率に関して、断面水路で得られた実験結果に対する任意反射境界の計算精度を検証した。消波工の法面勾配がそれぞれ1:4/3、1:2である消波ブロック被覆堤における反射率の再現精度を示した図-1(a)および(b)では、計算結果は実験結果よりも若干大きめながらも、波高や周期、水深が異なるさまざまな波浪条件で生じる任意の反射率をよく再現していることがわかる。

### (3) 海岸モデルにおける反射波の計算法

海浜地形のように勾配の緩やかな斜面における反射率

の概略値は、風波やうねりに対して、一般に0.05~0.2程度である。一方、Battjes(1974)は、一様勾配斜面上の規則波の碎波、遡上および反射の状況が、surf similarity parameter:  $\xi$  (またはイリバーレン数、式(4))を用いて整理できることを示した。ここで、 $\tan \beta$ は斜面勾配、 $L_0$ は沖波波長、 $H$ は斜面のり先の波高である。これによると、碎波形式は式(5)のように分類され、一様勾配斜面におけるおよその反射率は式(6)で与えられる。

$$\text{イリバーレン数 } \xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H/L_0}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

|      |         |                      |                        |
|------|---------|----------------------|------------------------|
| 碎波形式 | 崩れ波碎波   | $\xi \leq 0.4$       | } \quad \dots\dots (5) |
|      | 巻き波碎波   | $0.4 < \xi \leq 2.0$ |                        |
|      | 巻き寄せ碎波  | $2.0 < \xi \leq 4.3$ |                        |
|      | /碎け寄せ碎波 |                      |                        |
|      | 非碎波     | $4.3 < \xi$          |                        |

$$\text{斜面の反射率 } K_r = 0.1 \xi^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

これらより、斜面地形における反射率は碎波の形態によって変化することがわかる。

M港内の自然海浜や人工海浜による波の反射を厳密に再現するためには、本来、波の碎波変形や遡上に対する計算精度を高める必要がある。しかし現状のブシネスクモデルではこれらの計算法は必ずしも確立されていない。そこで、海浜地形による波の減衰や反射を再現するために、斜面地形の岸側に数値計算上の最小水深を設定し、それ以後の碎波や浸透による波エネルギー減衰を岸側のスポンジ層によって表現する海浜モデルを提案する。

一様勾配斜面に対して次のように設定した海浜モデルを用いて、波の反射に関する数値実験を行った。斜面沖側は水深 $h=20$ mの水平床とし、その沖側には十分な幅の高次スポンジ層と線境界入射法による吸収造波境界を設置した。一方、岸側の最小水深は $h_{\min}=4$ mとし、一様水深上に設置されたスポンジ層の幅は $F=120$ m、エネルギー吸収係数 $\sigma$ の強度は $\theta=1.0$ でそれぞれ一定とした。斜面勾配は $\tan \beta=0.02, 0.05, 0.10$ の3種類とした。入射波には、次のように設定された規則波を用いた。

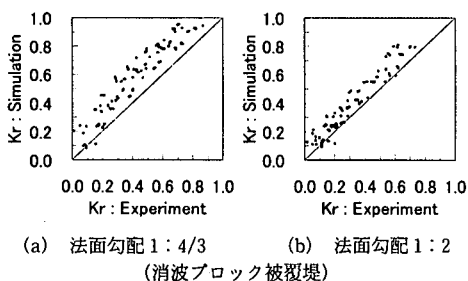


図-1 任意反射境界による反射率の再現性

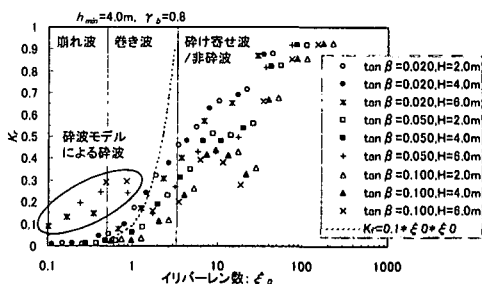


図-2  $\xi$  値に対する海浜モデルの反射率

すなわち、斜面岸側端の最小水深  $h_{\min}=4\text{ m}$  上での波高が  $H_{\min}=2\text{ m}, 4\text{ m}, 6\text{ m}$  となるような換算沖波波高  $H_0'$  を設定し、これらから算定される入射境界の水深  $h=20\text{ m}$  上での波高を入射波高  $H$  とした。また入射波の周期は、風波やうねり、長周期波を対象として、 $T=8\sim 400\text{ s}$  の 10 種類とした。

数値実験において、最小水深より深い斜面上で碎波が生じる場合には、その碎波減衰は前述の碎波モデルによって算定するものとした。碎波限界となる流速波速比は  $\gamma_b=0.8$  とした。また、反射率の推定は、斜面沖側の水位変動出力点で得られた波形記録を用いて、入射波スペクトル分離法により実施した。

計算結果を図-2 に示す。図中の細実線は式 (5) に従って分類した碎波形式の境界を示し、点線は式 (6) で表される斜面の反射率に関する経験式を示す。計算結果のうち、斜面上で碎波したときの反射率は式 (6) による値よりも大きい。これらは、現在の碎波モデルによって海浜地形による波の反射を表現することが難しいことを示している。ただし、ここで用いた推定法における、碎波した波に対する反射率の推定精度については不明である。

崩れ波碎波や巻き波碎波が生じる風波や比較的周期の短いうねりが海浜に入射し、かつ、斜面上では碎波せず、最小水深上のスポンジ層によって碎波による波浪減衰が表現される場合には、特に斜面勾配を  $\tan \beta=0.02$  とした海浜モデルによる反射率は、式 (6) による値と非常によく一致した。ところが、斜面勾配を  $\tan \beta=0.05, 0.10$  とした海浜モデルによる反射率は、式 (6) による値に比べ小さくなった。これは、斜面勾配の増加に伴ってイリバーレン数  $\xi$  が大きくなるのに対し、スポンジ層によるエネルギー減衰量はさほど変化しないためである。

一方、比較的周期の長いうねりや長周期波が海浜に入射した場合には、巻き寄せ波碎波や砕け寄せ波碎波が生

じるか、非碎波となる。この場合の反射率は、碎波減衰量の減少に伴って急激に大きくなる反面、海水が海浜へ浸透することによる波エネルギーの減衰量も増加すると考えられるため、イリバーレン数  $\xi$  に対する海浜の反射率の増加割合は式 (6) によるものに比べ幾分小さくなると予想される。海浜モデルによって計算される反射率は、このような傾向を結果的によく表している。

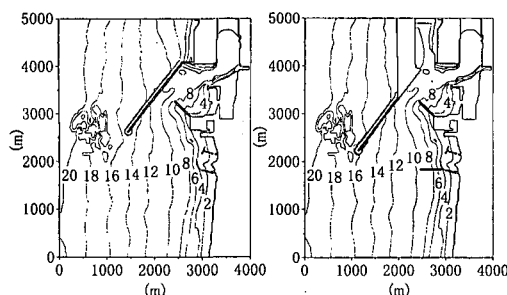
これらの結果より、碎波による波浪減衰をスポンジ層によるエネルギー減衰によって表現した海岸モデルは、斜面勾配に応じて適切なスポンジ層の幅や強度を設定することにより、最小水深よりも浅い斜面上で生じるであろうそれぞれの碎波形態に対する反射率を、ほぼ妥当に計算できると考えられる。

### 3. M 港における港内波浪変形計算

港内波浪変形計算は M 港の現況地形と将来地形を対象に実施し、それぞれの模型実験結果に対する計算精度を検証した上で、風波および長周期波に対する主防波堤延伸や新たな遊水部設置による港内波浪の変化を検討した。

#### (1) 計算条件の設定

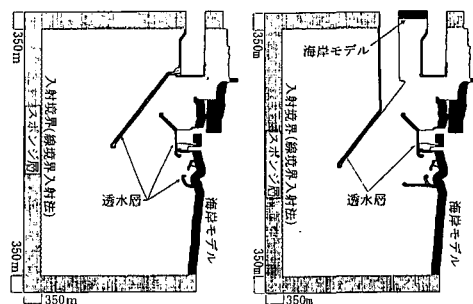
M 港における現況および将来の港形と海底地形を図-3(a), (b) に示す。計算領域沖側(入射境界)の水深は、 $20\text{ m}$  で一定とした。計算対象とした M 港の現況地形は次のようである。周辺海域では、主防波堤沖側に存在する浅瀬を除き、主防波堤背後まで勾配  $1/200$  の一様斜面が続いている。一方、水深  $9\text{ m}$  の航路および泊地が整備された港奥部の対岸には、水深  $1\text{ m}$  程度の潟が未整備のまま残されている。また、副防波堤背後の水域や沿岸域には人工海浜や自然海浜が存在する。さらに、沖防波堤を  $500\text{ m}$  延伸し、沖防波堤の根元に新たな遊水部を創設する M 港の将来地形では、比較的閉じた海域となる遊水部に副振動や長周期波の増幅が生じることが懸念される。その対策例として、本研究では遊水部奥に緩衝海



(a) 現況地形

(b) 将来地形

図-3 M 港の港形と海底地形



(a) 現況地形

(b) 将来地形

図-4 計算領域の設定

浜を設置した。なお数値計算では、D.L.を基準とする両図に、朔望平均満潮位 (D.L.+2.07 m) を加えた水深を用いた。

沖波は、設計波相当の風波 (有義波高  $H_{1/3}=11.0$  m, 有義波周期  $T_{1/3}=13.5$  s) と, 風波より推定される長周期波 (周期  $T_L=30$  s~300 s) とした。波向は ESE と ENE の 2 種類とした。風波は, 修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルと光易型方向関数からなる  $S_{\max}=25$  の多方向不規則波とし, 長周期波は, 平石ら (1997) が提案した直線型スペクトルを有する一方向波とした。長周期波のエネルギーレベルを表す  $\alpha_L$  は, 周辺港湾で得られた値を参考に 1.65 と設定した。レーリー分布を仮定すると, 設計波に対する長周期波の波高は約 1.62 m と見

積もられる。

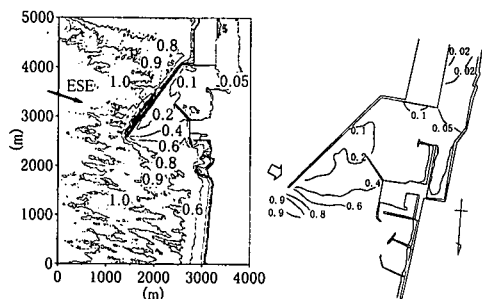
これらの計算ケースをまとめて表-1 に示す。

次に, 数値計算において設定した開境界, 海岸モデルおよび任意反射境界の位置を図-4(a), (b) に示す。計算領域の周囲には, 開境界を実現する高次スポンジ層を入射波の有義値の 2 波長幅で設定した。ただし長周期波を用いた計算では, スポンジ層は最大波長の 1 波長幅のみを確保し, その外縁にゾンマーフェルトの透過条件を適用した。一方, 海浜部には次の海岸モデルを設置した。最小水深は  $h_{\min}=4$  m とし, スポンジ層の幅は風波に対する反射率が十分小さくなるように  $F=170$  m とした。さらに, 消波ブロックで被覆された防波堤や護岸では, 次の任意反射境界を設定した。透水層の幅  $B$  を現地の消波工設置幅と等しく設定すると, 透水層の空隙率  $\lambda$  は, 消波工の空隙率を  $\lambda_0=0.45$  として式 (2) で与えられる。例えば 64 t テトラポッドで乱積被覆されている M 港主防波堤では, 消波材の形状や積み方を表す定数は  $\omega_0=2100$ ,  $\beta_0=2.2$ , 代表径は  $d=2.95$  m であるので, 透水層内の層流および乱流抵抗係数  $\alpha$ ,  $\beta$  は, 式 (3) から客観的に決定される。

なお, 数値計算における差分格子間隔  $\Delta x$  および差分時間間隔  $\Delta t$  はそれぞれ, 風波では  $\Delta x=10$  m,  $\Delta t=T_{1/3}/400$  s, 長周期波では  $\Delta x=25$  m,  $\Delta t=0.25$  s とした。

表-1 M 港における港内波浪変形計算ケース表

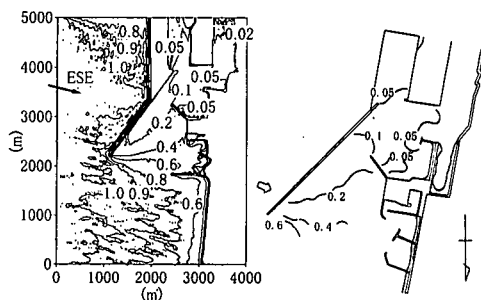
| No. | Case     | Wave Condition                                 |           |            | Tide        | Topography |
|-----|----------|------------------------------------------------|-----------|------------|-------------|------------|
|     |          | Height and Period                              | Direction | $S_{\max}$ |             |            |
| 1   | MtS0010  | 風波<br>$H_{1/3}=11.0$ m,<br>$T_{1/3}=13.5$ s    | ESE       | 25         | D.L.+2.07 m | 現地地形       |
| 2   | MtS0030  |                                                | ENE       | 25         |             | 現地地形       |
| 3   | MtS1111  |                                                | ESE       | 25         |             | 将来地形       |
| 4   | MtS1131  |                                                | ENE       | 25         |             | 将来地形       |
| 5   | IrrL0010 | 長周期波<br>$\alpha_L=1.65$ ,<br>$T_L=30\sim300$ s | NSE       | $\infty$   |             | 現地地形       |
| 6   | IrrL0030 |                                                | ENE       | $\infty$   |             | 現地地形       |
| 7   | IrrL1111 |                                                | ESE       | $\infty$   |             | 将来地形       |
| 8   | IrrL1131 |                                                | ENE       | $\infty$   |             | 将来地形       |



(a) 数値計算

(b) 模型実験

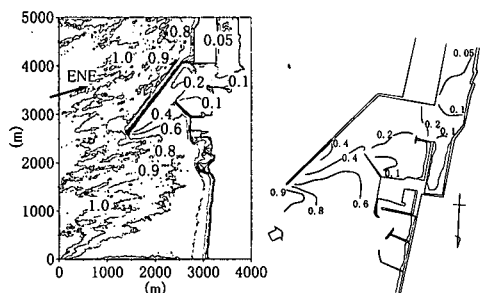
図-5 現況地形 (風波: 波向 ESE) の波高比分布



(a) 数値計算

(b) 模型実験

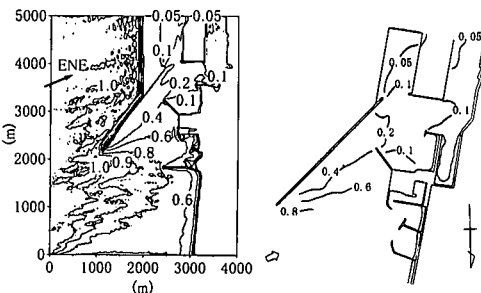
図-7 将来地形 (風波: 波向 ESE) の波高比分布



(a) 数値計算

(b) 模型実験

図-6 現況地形 (風波: 波向 ENE) の波高比分布



(a) 数値計算

(b) 模型実験

図-8 将来地形 (風波: 波向 ENE) の波高比分布

## (2) 風波に対する計算精度の検証

このようにして計算された、M 港の現地地形および将来地形における風波の波高比分布を、別途実施された模型実験結果と合わせて図-5~図-8 に示す。多方向波で計算された数値計算に対し、模型実験で造波された風波は一方波である。しかし、M 港沖合から港内に至る、汀線に平行でかつ単調な等深線海域でみられる屈折変形のために、数値計算および模型実験において、港口部でみられる波の集中度はほぼ同等であると考えられる。なお、波高比分布は、港内で観測された有義波高を港外の代表点での有義波高で除して求めた。また、数値計算における港内の有義波高は、各計算格子でゼロアップクロス法による平均波高を算出し、さらにレーリー分布を仮定して、それらに 1.6 を乗じて求めた。

現地地形における風波の波高比分布を示した図-5 および図-6 をみると、いずれの波向でも、計算結果は実験結果をよく再現していることがわかる。特に主防波堤背後の波高分布を精度よく再現できている理由は、堤頭部周囲の巻込み消波とマウンド工を表現した任意反射境界によって、入射波に伴う散乱波に加え、反射波や反射波に伴う散乱波を正しく算定できたこと、およびマウンド工による局所的な波の屈折変形を考慮したことによると考えられる。また、将来地形における風波の波高比分布を示した図-7 および図-8 でも、計算結果は、実験結果でみられた沖防波堤延長による港内波高の減少や遊水部の波高比分布をよく再現していることがわかる。さらに、現況地形および将来地形ともに、沖波が港内に侵入しやすい波向 ENE のときにみられる港内波高は、波向 ESE のときに比べ、全体的に 1~2 割程度大きくくなっている。

## (3) 長周期波に対する港内波高分布

周期  $T_L = 30 \sim 300$  s の成分波からなるそれぞれ波向 ESE, ENE の長周期波に対して算定された波高比分布のうち、将来地形の結果を図-9(a), (b) に示す。いずれの波向とも、風波のときに比べ、沖防波堤端部による波の回折がかなり小さくなることがわかる。にもかかわらず風波に比べ、港内で大きな波高比がみられるのは、港内の消波構造物や自然海浜・人工海浜による長周期波の反射率が、より大きく計算されているためである。特に、消波ブロック被覆堤の前面でみられる局所的な波高比の増大は、現地に施工された消波工の長周期波に対する消波効果があまり期待できないことを示している。また、防波堤と護岸の法線が隅角をなす海域では、反射波が集中することにより 2.0 程度の波高比が現れている(図-9(a))。これらに比べ、遊水部や港奥部の波高比の増幅はほとんどみられない。これは、海浜モデルによって再現された、遊水部奥の緩衝海浜や港奥部の対岸に位置する

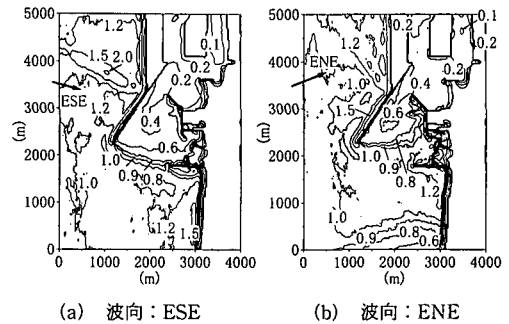


図-9 将来地形(長周期波)の波高比分布

自然海浜の、長周期波に対する消波機能によるものと考えられる。

## 4. おわりに

M 港固有の地形条件や消波構造物の諸元を用いて実施したブシネスクモデルによる港内波浪変形計算では、別途実施された模型実験結果をよく再現するとともに、風波と長周期波のそれぞれに対して、消波構造物や自然・人工海浜における反射率の違いや港形に対する波高分布の違いを明瞭に示す計算結果を得た。

## 参考文献

- 喜岡 渉・柏原謙爾・相川久紀・田中正博(1996): 多方向不規則波による港内副振動の予測モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 196-200.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三(1997): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 246-250.
- 平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功(2000): 熊本県電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(2001a): 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.
- 平山克也(2001b): ブシネスクモデルにおける任意反射境界処理法を用いた非線形部分重複波の計算, 港空研報告, 第40巻, 第4号, pp. 3-48.
- 平山克也・上原 功・平石哲也(2000): 領域接続法を用いた時間発展型地形変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 196-200.
- 平山克也・平石哲也(2001): 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, 港研報告, 第40巻, 第1号, pp. 3-30.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1993-2004.
- Madsen, P. A. and O. R. Sørensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 183-204.