

消波室内水深を浅くした複数スリット壁 直立消波工の消波機能 - BIM 解析 -

THE EFFECT OF THE DEPTH OF WAVE CHAMBERS OF A DOUBLE SLIT-WALL BREAKWATER ON WAVE REFLECTION

角野昇八¹・塩崎禎郎²・原山之克³

Shohachi KAKUNO, Yoshio SHIOZAKI, and Yukikatsu HARAYAMA

¹正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

²正会員 工修 NKK 都市工学研究部 (〒210 川崎市川崎区南波田町 1-1)

³大成建設(株) (元大阪市立大学工学部土木工学科学生)

The reflection of small amplitude water waves impinging on a double slit-wall breakwater is numerically studied by applying the Boundary Integral Method (BIM). The depth of wave chambers can be changed from the one outside of the chamber in the present numerical analysis. The energy loss due to flow separation near slits is modeled by introducing a complex blockage coefficient. Comparison of numerical results with experimental data shows the validity of the present analysis. Using the present numerical scheme, a favorable depth of wave chambers and a favorable position of second slit wall in the wave chamber are studied and discussed. A comparison with a single slit-wall breakwater in reflection coefficient is also made.

Key Words Slit type breakwater, boundary integral method, wave reflection

1. 緒言

湾内を航行する小型船舶のための消波や防波堤作用波力軽減の目的、あるいは建設コストの経済性のメリットを求めて、スリットの前面壁と背面不透過壁を基本構成要素とする直立消波工の施工は今後とも増えるものと思われる。また、その背面不透過壁に開口部を設ければ、上記の機能のほかに、防波堤前後間の海水交換機能も付加的に期待できることから、この種の構造形式への期待が高まっている。直立消波工の形式としては、これまで、前面壁が1枚のものがもっぱら用いられてきた。しかるに、最近では、広い周波数帯域にわたった消波機能を期待して、スリット壁を複数とした形式も各地で見られるようになってきた。

複数列の前面スリット壁をもつ消波工の消波効果に関する研究としては、既に萩原¹⁾や著者ら^{2) 3)}によるものがある。しかるにそれらの解析では、消波室内水深は室外水深と同じ水深である必要があった。一方、1列のスリット壁をもつ直立消波工に対して、消波室内水深を変化させた場合の消波効果を、BIM(境界積分法)を用いた数値解析より著者らは既に明らかにしている⁴⁾。

本研究では、この1列の場合に引き続き、複数列のスリット壁をもつ消波工に対する同様の数値解析手法を展開するとともに、その手法を用いて、2列のスリット壁をもつ消波工を対象として、消波室内水深を浅くすることで消波機能がどのように変化するのか、また消波機能から見た最適の同水深はいくらであるのか、さらに、岸側のスリット壁の位置が消波機能に与える影響について、種々の検討を加える。また、スリット壁が1枚の消波工の消波特性と比較してその優位性を確認する。

なお、本解析においては、捨石マウンドの影響は考慮に入れていない。また、より厳密な漸近展開法によった著者らの理論解析^{2) 3)}では考慮が不要であったスリット壁厚の見かけの増加量⁴⁾をここでは導入している。

2. 理論

(1) 問題の定式化

一定水深 h の水域に設置された2列のスリットの前面壁をもつ直立消波工を解析対象とする(図-1参照)。全消波室幅は l であり、沖側前面壁と岸側のその間隔を l_1 、岸側前面板と背面不透過壁と

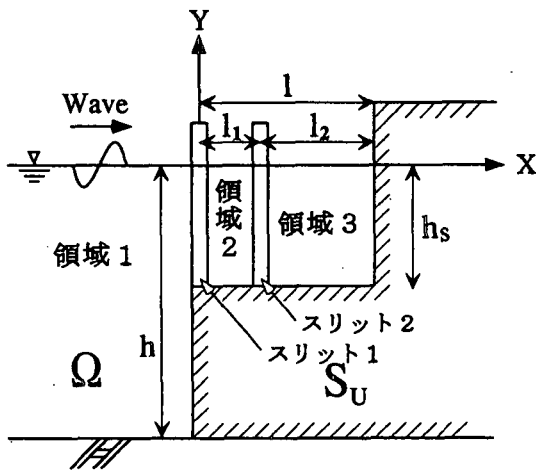


図-1 解析対象断面と座標系

の間隔を l_2 とする。消波室内水深は室外水深と異なっているとしてもよく、それを h_s とする。また、 x 軸を沖側スリット壁より波の進行方向にとり、 y 軸を静水面より鉛直上向きにとる。

このような構造物周囲のスリット壁のごく近傍を除く領域で非粘性・非圧縮性流体を仮定し、微小振幅波理論を適用する。このとき、領域に速度ポテンシャルの存在を仮定することができ、その時間項 $\exp(-i\sigma t)$ を除く項 $\phi(x, y)$ は、以下の支配方程式（2次元のラプラスの方程式）と境界条件を満足せねばならない。

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\partial \phi / \partial y - v \phi = 0, \quad \text{on } y = 0 \quad (2)$$

$$\partial \phi / \partial y = 0, \quad \text{on } y = -h, -h_s \quad (3)$$

$$\partial \phi / \partial x = 0, \quad \text{on } x = 0, x = l \quad (4)$$

$$\lim(-\partial \phi / \partial x - ik\phi) = 0, \quad \text{at } x \rightarrow -\infty \quad (5)$$

ただしここに、 i は虚数単位、 $\sigma = 2\pi/T$ （ T は波の周期）、 $v = \sigma^2/g$ （ g は重力加速度）、 k は波数（ $v = k \tanh kh$ を満足する実正根）である。なお、以後の記述では、 $\phi(x, y)$ を単に速度ポテンシャルと称する。

式（5）の放射条件は、ここで対象とする現象では、 ρ を複素の反射率として以下のようにおくことができる。

$$\phi(x, y) \rightarrow (e^{ikx} + \rho e^{-ikx}) \cosh k(y+h) / \cosh kh, \quad (x \rightarrow -\infty) \quad (6)$$

上記のように定式化された問題を解析するにあたり、本研究では、まず全領域をスリット壁近傍を除く領域とスリット壁近傍領域とに分け、前者の領域に対してグリーン関数を用いたグリーンの定理を適用する。また、後者の領域では、スリットを通過する際の流れを表す解を別途用意する。そして、両者の解を両領域境界で接合することにより、最終的に全領域で有効な解を得るようにする。以後、前者の解を外解、後者のそれを内解と称する。

(2) 境界積分方程式（外的解）

外的解を設定するにあたり、スリット壁近傍を除く全領域を、スリット壁を境界として3つの領域に分け（図-1参照）、それぞれの領域についてグリーンの定理を適用すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \phi_1(\xi, \eta) = & \phi_0(\xi, \eta) + \int_{-h}^{h_s} \phi_1(0, y) \frac{\partial G_1}{\partial x}(0, y; \xi, \eta) dy \\ & + \int_{-h_s}^0 \left\{ \phi_1(0, y) \frac{\partial G_1}{\partial x}(0, y; \xi, \eta) - \frac{\partial \phi_1}{\partial x}(0, y) G_1(0, y; \xi, \eta) \right\} dy \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_2(\xi, \eta) = & \int_{-h_s}^0 \left\{ \frac{\partial \phi_2}{\partial x}(0, y) G_2(0, y; \xi, \eta) - \phi_2(0, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(0, y; \xi, \eta) \right\} dy \\ & + \int_{-h_s}^0 \left\{ \phi_2(l_1, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(l_1, y; \xi, \eta) - \frac{\partial \phi_2}{\partial x}(l_1, y) G_2(l_1, y; \xi, \eta) \right\} dy \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \phi_3(\xi, \eta) = & \int_{-h_s}^0 \left\{ \frac{\partial \phi_3}{\partial x}(l_1, y) G_3(l_1, y; \xi, \eta) - \phi_3(l_1, y) \frac{\partial G_3}{\partial x}(l_1, y; \xi, \eta) \right\} dy \\ & + \int_{-h_s}^0 \phi_3(l, y) \frac{\partial G_3}{\partial x}(l, y; \xi, \eta) dy \end{aligned} \quad (9)$$

ここに ϕ_0 は入射波の速度ポテンシャルであり、 G はグリーン関数、添字は各領域を表す。また、 (ξ, η) は領域内の座標、 (x, y) は積分経路上の座標を表している。さらに、ここで用いたグリーン関数は水面での境界条件式（2）および水底での境界条件式（3）、放射条件（5）を満足するような関数を選択するので、水面や水底および無限遠境界は積分境界に含まれないことに注意したい。

(3) スリット壁近傍における解（内的解）

境界積分方程式で表される前記の外的解には、スリット壁近傍での特異な水理挙動を表す項が全く含まれていないので、そのままでは解としては不十分である。本研究でも、従来⁴⁾ 同様、ここでの挙動を表す以下の解析解を別途用意する。

$$\phi(\xi, \eta) = (\xi + C(\eta))U(\eta) + C_0'(\eta) \quad (10)$$

ここに、正負符号はそれぞれスリット壁の沖側あるいは岸側の領域に対応し、 $U(\eta)$ はスリット壁通過前後の一樣流の流速、 $C_0'(\eta)$ は任意複素定数である。また、 $C(\eta)$ は "blockage coefficient" とよばれ、鉛直スリット壁の平面断面形状から一義的に決定される理論実定数であり、単純断面を有するものに対してはその形がすでに求められている⁵⁾。

(4) 外的解と内的解の接合

外的解と内的解を接合するための準備として、沖

側のスリット壁前後の外的解（式（7）（8））においては（ $\xi \rightarrow 0_{\pm}$ ）の極限操作をとり、岸側のスリット壁前後の外的解（式（8）（9））においては（ $\xi \rightarrow l_{1\pm}$ ）の極限操作をとる。ただしこのとき、たとえば $\partial G(0_{+}, y; 0_{+}, \eta) / \partial x$ などの量は0となる関係を利用している。これらを式（10）の内的解と接合（等値）すれば、最終的に解くべき積分方程として以下の2式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{-h_s}^0 U_1(y) \{G_1(0_{-}, y; 0_{-}, \eta) + G_2(0_{+}, y; 0_{+}, \eta)\} dy - C_1(\eta) U_1(\eta) \\ &= \phi_0(0_{-}, \eta) \\ &+ \int_{-h_s}^0 \{U_2(y) G_2(l_{1-}, y; 0_{+}, \eta) - \phi_2(l_{1-}, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(l_{1-}, y; 0_{+}, \eta)\} dy \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_{-h_s}^0 U_2(y) \{G_2(l_{1-}, y; l_{1-}, \eta) + G_3(l_{1+}, y; l_{1+}, \eta)\} dy - C_2(\eta) U_2(\eta) \\ &= \int_{-h_s}^0 \{U_1(y) G_2(0_{+}, y; l_{1-}, \eta) - \phi_2(0_{+}, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(0_{+}, y; l_{1-}, \eta) \\ &- \phi_3(l, y) \frac{\partial G_3}{\partial x}(l, y; l_{1+}, \eta)\} dy \end{aligned} \quad (12)$$

上式中には6つの未知関数 $U_1(y)$, $U_2(y)$, $\phi_2(0_{+}, y)$, $\phi_2(l_{1-}, y)$, $\phi_3(l, y)$ が含まれるが、それらは、式（8）において（ $\xi \rightarrow 0_{+}$ および l_{1-} ）に極限操作した式、式（9）において（ $\xi \rightarrow l_{1-}$ および l ）に極限操作した式と式（11）、および（12）を連立させることにより求めることができる。具体的操作は、式を離散化することによってなされるが、本解析における離散化要素長は、波長の3%以下となるようにした。

（5）グリーン関数

本研究で採用したグリーン関数は、一様水深場で水面と無限遠、水底での境界条件を満たしているもの（John (1950)⁶⁾）である。その関数に含まれる級数の取り扱い方は、角野ら⁴⁾と同様とした。

（6）見かけのスリット壁厚の増加量の導入

スリット壁の厚みの影響は、内的解には完全な形で考慮されているが外的解ではそれを無視した形となっている。したがって、その意味で解は厳密ではなく、近似値を与える。著者らの解析的研究⁵⁾では近似度を上げる取り扱いがなされているが、本研究におけるような断面内外で水深が一様でない場ではそのような取扱いは、現在のところ不可能である。そこで、ここでは、理論的裏付けは薄いものの、結果的に近似度を上げる効果をもつような見かけのスリット壁厚の増加量⁴⁾を導入した。その導入法は、各スリット壁の片側につき、増量

$$\varepsilon = (\pi b / 6)(1 - 2a / D) \quad (13)$$

だけスリット壁厚が増加されると考えるものである。ここに b はスリット壁厚、 $2a$ はスリット幅、 D は隣接柱体間隔である。したがって、外的解と内的解の接合境界の座標は、沖側スリット沖側および岸側では

$$x = -\varepsilon_1, \quad x = +\varepsilon_1 \quad (14)$$

岸側スリットの沖側と岸側では、

$$x = l_{1-} - \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad x = l_{1-} - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (15)$$

また、不透過壁前面では、

$$x = l - \varepsilon_1 \quad (16)$$

とおいた（図-2参照）。これと同時に、従来同様、blockage coefficient を ε だけ増している。

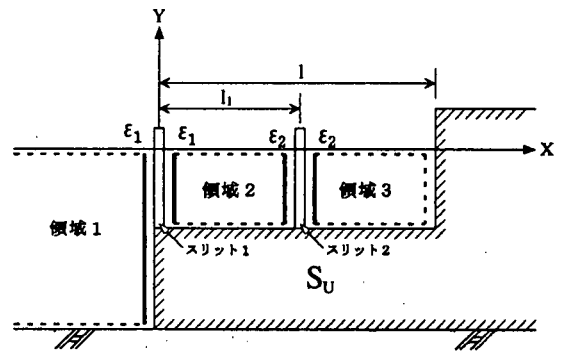


図-2 実際の接合境界

（7）スリット壁におけるエネルギー損失の評価

本解析において、スリット近傍を除く領域では非粘性流体を仮定しているが、スリット壁近傍では、スリットにおける渦の剥離に伴うエネルギー損失を考慮する。その影響は、従来同様、 $fV^2/2g$ （ f は損失係数、 V はスリット通過水粒子速度）の形の非線形損失と等価な1周期間仕事量をもつ線形損失を求め、その係数を、複素係数としたblockage coefficientの虚部に導入することにより評価する。損失係数の値は、各列とも従来と同様に $f=1.5$ （一定）とした。

3. 本手法の妥当性の検証

本手法の妥当性は、スリット壁における損失係数を $f=0$ として反射率が十分な精度で $K_R=1$ となったこと。また、 $h_s=h$ の条件下での既往の解析解²⁾と一致したことを確認して、手法の面での妥当性を確認した。

4. 実験値との比較

本手法による計算値を実験値とも比較して、その妥当性を確認した。

(1) 実験概要

実験対象の堤体は、設置水深を $h=50\text{cm}$ あるいは 55.3cm とし、全消波室幅を 32.3cm 、消波室内水深を 15cm もしくは 20.3cm とした。岸側スリット壁は、沖側壁より 12.5cm 岸側に設置した ($l_1/l=0.387$)。開口率は、沖側のそれを $2a_1/D_1=40\%$ ($2a_1=2\text{cm}$, $D_1=5\text{cm}$, $b_1=2\text{cm}$)、岸側のものを $2a_2/D_2=20\%$ ($2a_2=0.9\text{cm}$, $D_2=4.4\text{cm}$, $b_2=1.7\text{cm}$) とした。波の条件は、周期を 0.5秒 から 2.19秒 まで変化させ、目標波高を 3.3cm , 6.7cm , 10.0cm とした。実験値との比較対象の波は規則波であり、反射率の測定は入反射波分離法により行った。

(2) 実験値との比較

図-3 (a)(b)は、実験結果のうち、波形勾配が $H/L=0.01, 0.03, 0.05, 0.08$ に近いものを選び出し、横軸を相対消波室幅 (l/L) として計算値と比較したものである。いずれの条件でも計算値は実験値とよく合致していて、本手法の妥当性が証明されている。波形勾配が大きい場合に実験値が計算値を若干下回るケースが見られるが、これは大きな波形勾配のために沖やスリット壁付近で砕波を起こしたため

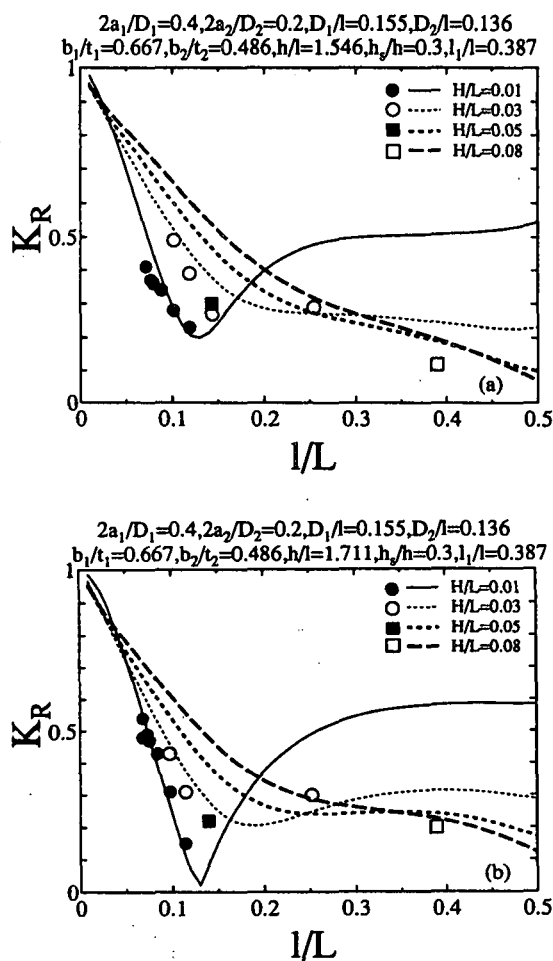


図-3 実験値との比較

(a) $h=50.0\text{cm}$, (b) $h=55.3\text{cm}$

であると推察される。また、図-4は、種々の条件にある反射率の全実験値を同条件の計算値と対照させたものであるが、両者の合致度はよい。

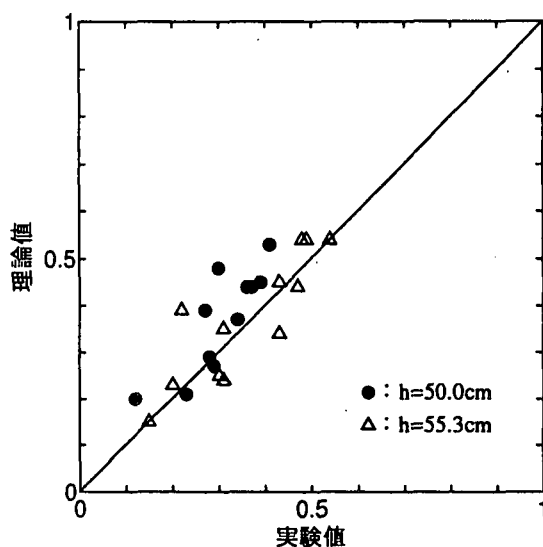


図-4 全実験値との比較

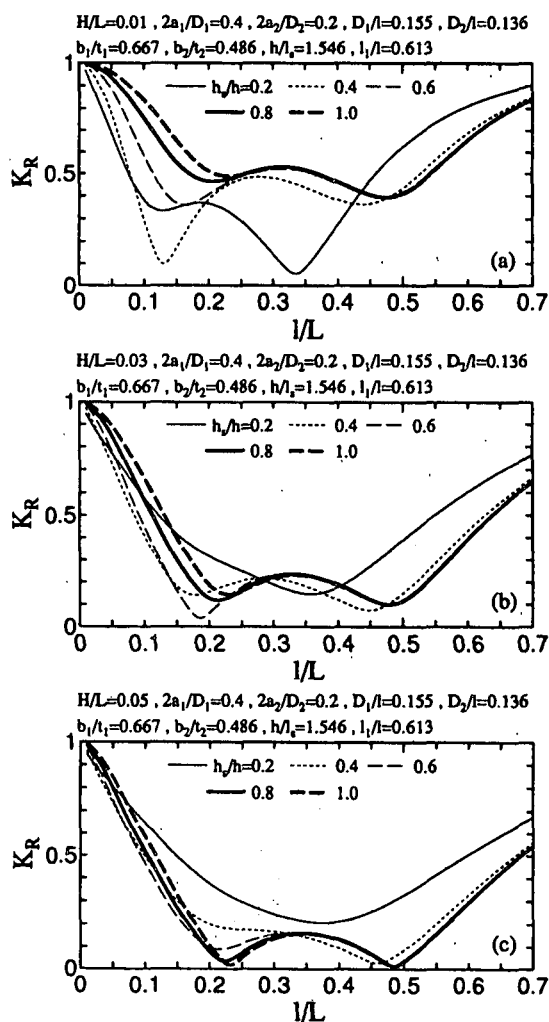


図-5 消波室内水深を浅くすることの効果

(a) $H/L=0.01$, (b) $H/L=0.03$, (c) $H/L=0.05$

5. 消波室内水深変化が反射率に与える影響

スリットの壁が1枚の場合について、消波室内水深が浅くなった場合の反射率に与える影響についてはすでに検討済みであり、波形勾配が $H/L=0.01$ の条件では、消波室内水深を沖側水深の0.5~0.6倍にとれば最適の効果が得られることを示した⁴⁾。スリット壁が2枚の場合についても、消波室内水深の変化が反射率特性に与える影響をみてる。

図-5(a)~(c)は、岸側スリット壁の位置が $l_1/l=0.613$ にある条件下で、波形勾配を $H/L=0.01, 0.03, 0.05$ と変化した場合の反射率を l/L の関数として表したものである。これらの図によれば、 $H/L=0.01$ の時には、 l/L のほぼ全域にわたって $h_s/h=0.4$ で最小の反射率を示している。しかし、波形勾配が大きくなれば、それ以上の値でも良好な消波効果が得られ、室内水深が室外水深と同じとなっても($h_s/h=1.0$)、変わらないことが示されている。結局、波形勾配全般にわたっては、 $h_s/h=0.4\sim 0.6$ が最適の消波室内水深といえそうである。

6. 岸側スリット壁位置の影響

図-6(a)~(c)は、岸側スリット位置が反射率特性に与える影響をみるために、消波室内水深を $h_s/h=0.4$ として、岸側スリット位置を $l_1/l=0.387, 0.500, 0.613$ と変えさせ、さらに波形勾配を $H/L=0.01, 0.03, 0.05$ と変化した場合の反射率特性を示している。いずれの波形勾配の条件においても、岸側スリット壁を中央部($l_1/l=0.500$)もしくは岸側寄り($l_1/l=0.613$)に位置させた場合が良好な反射率特性を示すことがわかる。

7. スリット壁が1枚の場合との比較

スリット壁の数を増やせば、それが1枚の場合と比べてどの程度、あるいはどのように反射率特性が変化するのか、実用上もメカニズムの点からも興味深い。図-7(a)~(c)は、表-1に示す条件にあって、もっとも良好な消波特性を示す二重スリット壁堤の反射率特性を、表-2に示す条件で最適の条件にある一重スリット壁堤のものと波形勾配別に比較した例である。一重スリット壁堤の反射率はある相対消波室幅で最小値をとったのち、波長が短くなるにつれて反射率が単調的に大きくなっていくのに対して、二重スリット壁堤の場合

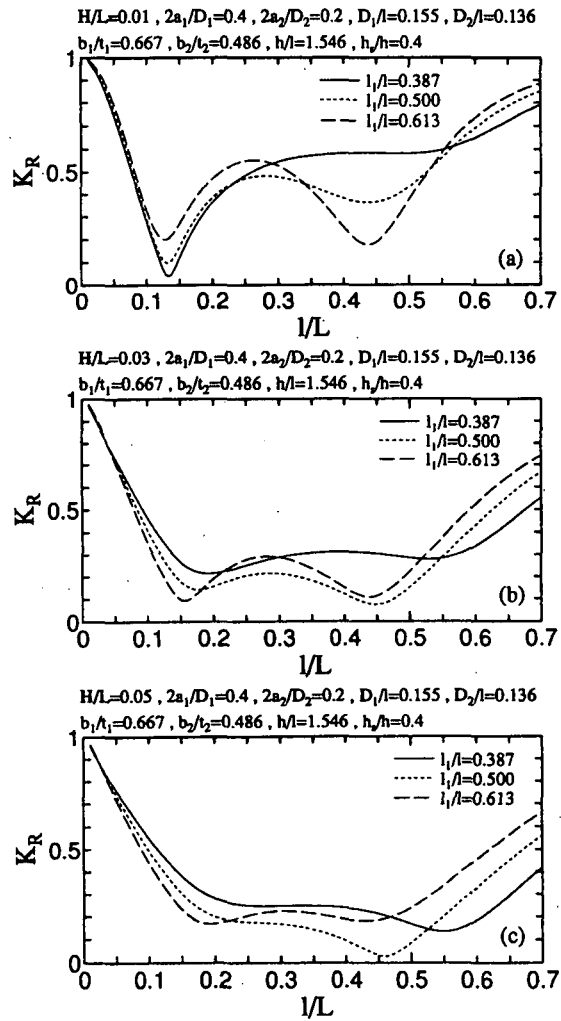


図-6 岸側スリット壁位置の影響

表-1 二重スリット壁堤計算条件

$h(m)$	h/l	$2a_1/D_1$	$2a_2/D_2$	D_1/l	D_2/l	h_s/h	l_1/l
15.0	1.546	0.4	0.2	0.155	0.136	0.4	0.613

表-2 一重スリット壁堤計算条件

$h(m)$	h/l	h_s/h	$2a/D$	D/l	b/t
15.0	1.546	0.4	0.3	0.17	0.500

には、短波長側で再度反射率が最小となる箇所があることがわかり、二重スリット壁堤は一重のものに比べてより広い周波数帯域で反射率を低減できることがわかる。また、二重でも一重でも、反射率が最小値をとる相対消波室幅はほぼ同じであり、反射率の値もほぼ同じであることもわかる。

8. 結言

消波室内水深を浅くした二重スリット壁直立消波工の消波特性を検討するために、BIM を適用した手法を展開して解析した。手法は既往の解析結果や実験値と比較して証明でき、以下の結果を得た。

(1) 消波室内水深は、室外水深の(40~60)%にとるのが望ましい。

(2) 岸側スリット壁位置は、消波室内中央部あるいはそれより若干岸側に設けるのが望ましい。

(3) 二重スリット壁とすれば、一重のものに比べて短周期側でも良好な消波効果を望むことができるようになる。

参考文献

- 1) 萩原運弘：多重スリット型構造物による波浪の制御効果と作用波力の特性に関する研究、大阪大学学位申請論文、1989。
- 2) 角野昇八・仲田義弘・藤原隆一：複数列の前面スリット壁をもつ直立消波工の消波特性、海洋開発論文集、第9巻、pp.259-264, 1993。
- 3) Shohachi Kakuno and Yoshihiro Nakata, Scattering of water waves by rows of cylinders with/without a back wall, Applied Ocean Research, Vol. 20, pp. 191-198, 1998。
- 4) 角野昇八・小田一紀・藤田孝・寺岡章吾・芳田利春、スリットと任意断面で構成される構造物の消波特性の解析、海岸工学論文集、Vol. 36, pp. 499-503, 1989。
- 5) たとえば Shohachi Kakuno, and Philip L.-F. Liu, Scattering of water waves by vertical cylinders, J. of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 119, No.3, pp.302-322, 1994。
- 6) John F., On the motion of floating bodies, II, Comm. on Pure and Applied Math., Vol.3, No.1, pp.45-101, 1950。

(1999.4.19 受付)

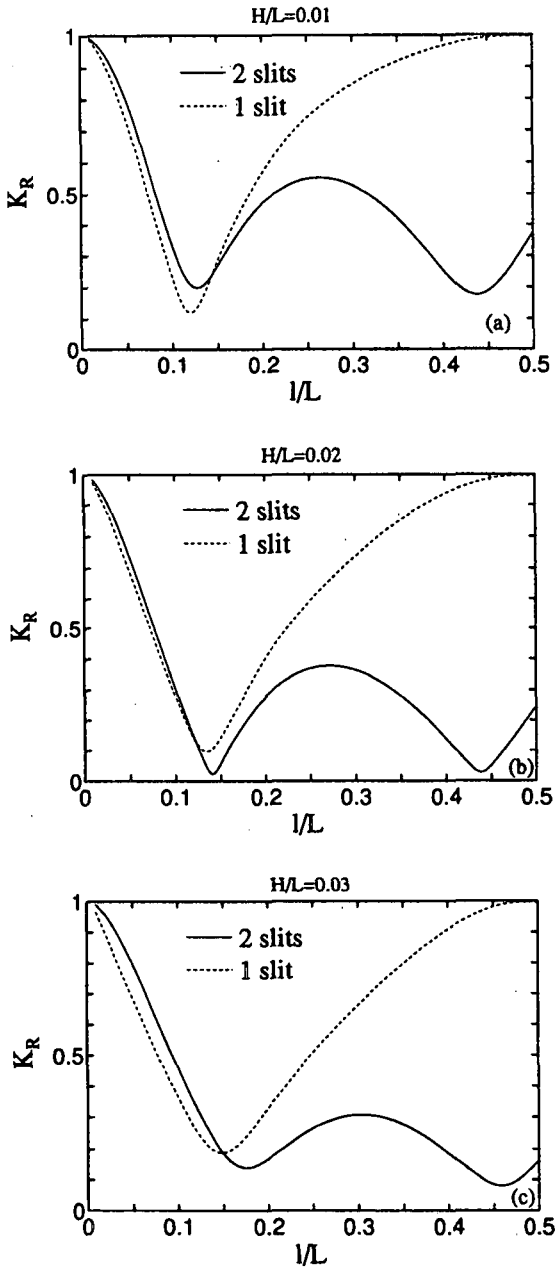


図-7 1枚のスリット壁の場合との比較