

消波性能からみた二重スリットケーソンの最適構造諸元の決定法の提案

角野昇八* ・辻本剛三** ・塩崎禎郎***
中木原宏文**** ・重松孝昌*****

1. はじめに

港湾・漁港の大水深域への拡張や狭い水域の有効利用の観点から、直立消波構造物への需要は今後とも減ることはないと思われる。直立消波構造物は、1枚のスリット壁をもつ一重スリットケーソン（以下、一重スリット堤）が一般的と思われるが、消波可能な波の周波数帯が狭く、広い周波数帯域に及ぶ消波が必要な時にはその点が難点とされる。この点を克服するため、各種の改良形式が提案されている。二重スリットケーソン（以下、二重スリット堤）はその一つであり、各地でその施工例も多い。しかし、二重スリット堤の反射率を支配するパラメータが多いため、実験的に構造諸元を決定し、設計を行っているのが実状である。本研究では、著者ら(1999, 2000)により、すでに数多くの実験値との比較によってその妥当性が確認されている二重スリット堤の反射率算定の数値解析を援用して、消波性能の面からみた二重スリット堤の最適構造形式、具体的には反射率が0.4以下となる構造形式を決定するための具体的手法の提案を目的とする。

2. 従来の研究

複数列の前面スリット壁を有する消波工の消波効果に関する研究には、萩原(1989)、著者ら(1993, 1999, 2000)によるものがあり、特に著者ら(1999, 2000)は、一重スリット堤に適用した境界積分法を二重スリット堤に拡張し、反射率の算定を精度よく行うとともに、消波室内の水深、岸側スリット壁の位置などの影響を検討し、一重スリット堤との比較によりその優位性を確認している。しかしながら、設計を念頭においた整理ではないため、最適構造諸元の決定には利用しにくい側面があった。

一方、谷本ら(1982)も一重スリット堤を理論的・実験的に解析し、反射率に及ぼす構造条件の考察を行って

るが、二重スリット堤に関しては扱っていない。

3. 反射率を決定する自然条件と構造物条件

3.1 条件の無次元化

一重、二重に関わらず、スリットケーソンの反射率を決定する物理的諸量は、 H :波高、 h :水深、 T :周期、 L :波長の自然条件以外には、図-1に示す通りである。（この他に消波室内水深 h_s がある）これらの諸量を用いた無次元パラメータは以下になる。

H/L : 波形勾配

l/L : 相対消波室幅

h/l : 消波室断面縦横比

h_s/h : 相対消波室内水深

$2a_1/D_1, 2a_2/D_2$: 開口率

$b_1/t_1, b_2/t_2$: 柱体平面断面縦横比

$D_1/l_1, D_2/l_2$: 消波室平面縦横比

l_1/l : 消波室幅比

以上の様にパラメータ数は11にも及ぶので、以下では各種パラメータが反射率に及ぼす影響を検討し、最適の構造諸元の決定法について考察する。

3.2 標準断面での一重・二重スリット堤の比較

図-2は、水深15m地点での施工例を基に設定した構造諸元を有する二重スリット堤の反射率の分布を縦軸 H/L 、横軸 l/L で示した図である。以後、この断面を「標準断面」と称する。二重スリット堤が適用される海域は、波高や周期に幅があるために消波対象波が複数となり、

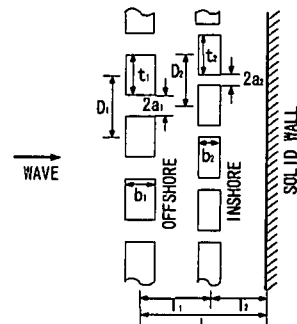


図-1 二重スリットケーソンの構造条件

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

** 正 会 員 工 博 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科

*** 正 会 員 工 修 NKK 都市工学研究部

**** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻

***** 正 会 員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科土木工学専攻

表-1 計算条件

$2a/D$	b/t	D/l	h/l	h_s/h	l_1/l	
0.5 0.2	0.8 0.4	0.4 0.544	1.563	0.333	0.521	図-2, 図-4~図-9
0.3	0.8	0.303	2.273	0.333	—	図-3
0.5 0.2	0.3 0.4	0.4 0.544	***	***	0.521	図-11
0.3	0.3	0.3	***	***	—	図-10

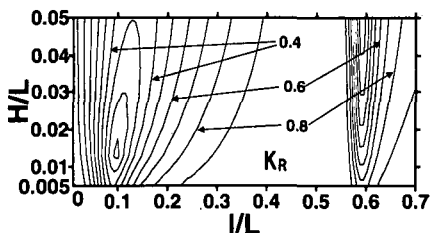


図-3 一重スリットケーソンの反射率の分布

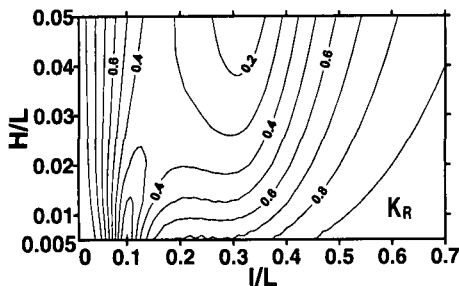


図-2 二重スリットケーソンの反射率の分布

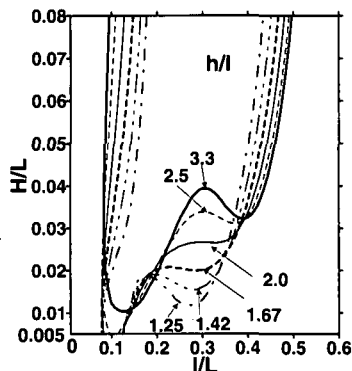


図-4 消波室断面縦横比と目標反射率の変化

長周期側の波浪に対して設定された構造諸元が他の消波対象波に対しても適切であるかの判断が必要になるので、以後では標準断面の構造諸元を基本としてパラメータの感度解析を行い、 H/L および l/L の関数として結果を表す。なお、計算条件はまとめて表-1 に示す。表中、上段が沖側、下段が岸側、*** は変化させたパラメータである。

図-3 には一重スリット堤の結果を示す。ただし、消波室幅を 6.6 m とし、開口率を 0.3 とした以外は標準断面と同じ諸元をほぼ持っている。両図の比較より、二重スリット堤では、波形勾配によらず目標の反射率に対して長周期側の l/L の値がほぼ一定であるとともに、短周期側への適用範囲を広くとることが可能であって、二重スリット堤の長所が明瞭である。また、適用可能な波形勾配の領域も広いことが解る。

3.3 構造条件の影響

(1) h/l : 消波室断面縦横比の影響

本研究で目標とする反射率は 0.4 以下であり、以後ではこの反射率を「目標反射率」と呼ぶ。図-4 は、図-2 に示されるような反射率の分布図より、目標反射率が達成される消波室断面縦横比 h/l の分布を表したものである。曲線の内側が目標反射率を満足する領域である。建設コストの観点からは、消波室幅 l は狭い方がよい。 h/l の増加（消波室幅の減少）に伴い目標反射率領域の長周期側および H/L の大きい短周期側は拡大するが、 l/L が 0.3 あたりで H/L の小さい短周期側が制限されている。

(2) h_s/h : 相対消波室内水深の影響

図-5 は相対消波室内水深比 h_s/h をパラメータとした目標反射率を満足する条件の分布である。消波室内水深 h_s も建設コスト観点から小さい方が望ましい。また、 h_s がほぼ 5 m 程度を超えると壁厚 b を厚くしなくてはならず、それに伴って構造設計が困難となる。図より、 h_s/h 値の低下に伴い、目標反射率を達成できる周期帯の幅が狭くなる一方で、小さい H/L 側でも目標値を達成できるようになっていることがわかる。

(3) $2a/D$: 開口率の影響

図-6 は沖側の開口率 $2a_1/D_1$ をパラメータとした目標反射率を満足する条件の領域である。0.5 前後の開口率で目標反射率の領域が最も大きくなる。ただし、この開口率は柱体列として算定されたもので、消波室内の底上げを考慮した実効数値はこれよりも小さくなる。図示していないが、岸側の開口率 $2a_2/D_2$ は沖側の値の半分から同程度が最適であった。

(4) b/t : 柱体平面断面縦横比の影響

図-7 は沖側のスリット壁の縦横比 b_1/t_1 をパラメータとした目標反射率を満足する条件の領域である。長周期側の限界はこの値の変化に関わらず一定値となっている。この値を小さくして扁平の断面とすれば、 $l/L=0.3$ 付近で H/L の小さい場合に若干の制約を受ける場合があるものの、短周期側では領域が広がっていて望ましいことがわかる。なお、岸側の縦横比 b_2/t_2 は目標反射率には影響をほとんど及ぼさない。

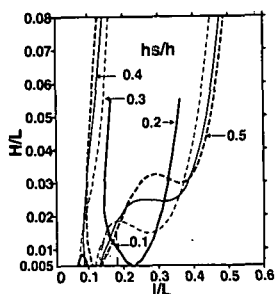


図-5 相対消波室内水深の影響

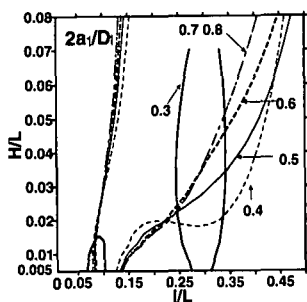


図-6 沖側開口率の影響

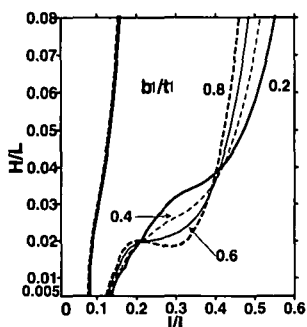


図-7 沖側柱断面縦横比の影響

(5) D_1/l : 消波室平面縦横比の影響

図-8は消波室平面縦横比 D_1/l をパラメータとした目標反射率の分布である。長周期側の限界は、この値にかかわらずほぼ一定であり、この傾向は D_2/l の変化に対しても同様であった。図より、この値が0.3~0.4程度の時が最適であることがわかるが、 D_2/l についても同様であった。この値は、 $l=10$ mを想定するとき $D=3\sim4$ m となって通常に施工される寸法とも合致している。

(6) l_1/l : 消波室幅比の影響

図-9は消波室幅比 l_1/l をパラメータとした、目標反射率を満足する条件の領域である。二重スリット堤の沖側及び岸側の消波室幅は、通常では同程度 ($l_1/l=0.5$) とすることが多いが、この図から l_1/l が0.5~0.6程度であれば目標反射率の範囲にはほとんど影響を与えない事が

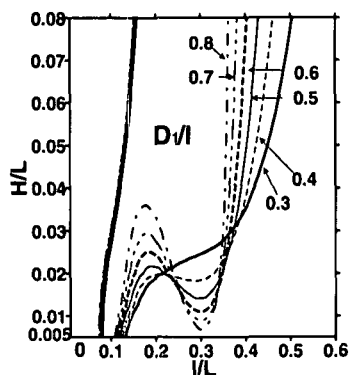


図-8 消波室平面縦横比の影響

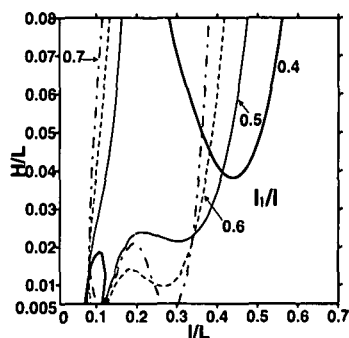


図-9 消波室幅比と目標反射率

わかる。また、 $l_1/l=0.6$ では、 $l_1/l=0.5$ に比べて短周期側の領域が狭まるものの、長周期側で広がる特性をもっている。

4. 最適構造諸元の決定法

4.1 重要パラメータの選択

以上のようにして、各パラメータの個々が目標反射率に及ぼす感度がある程度把握することができた。以下では、これらの結果を総合的に判断して最適構造諸元を決定する方法について検討する。

通常、設計の際には自然条件 (H : 波高, T : 周期, h : 水深, L : 波長) がまず与えられるので、波形勾配 H/L あるいは相対水深 h/L は一義的に決定される。これまでのいずれの図にも示されているように、長周期側の波長から決定される l は H/L の変化に対してほとんど変化せず、決定が容易である。しかも、短周期側の波浪の H/L に対しても一般に目標反射率を達成することが可能であるケースが多いので、 H/L の影響を陽的に表示する必要はない。また、前述したように、 l/L , h/L は建設コストの面からもきわめて重要であり、これらの影響は陽的に示されることが望ましい。一方、 h/l の値も反射率を決定するパラメータの一つであるが、 l が2つのパラメータ

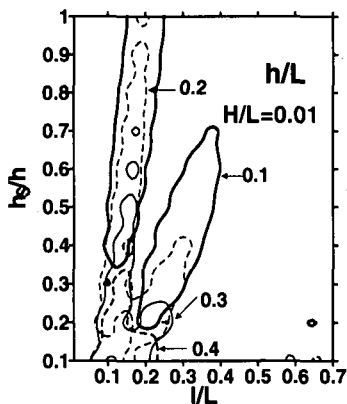


図-10(a) 一重スリット堤の目標反射率の分布

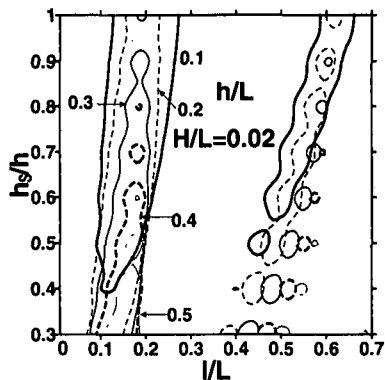


図-10(b) 一重スリット堤の目標反射率の分布

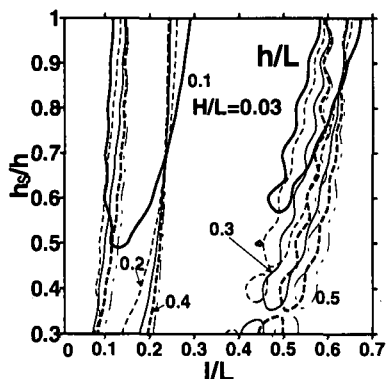


図-10(c) 一重スリット堤の目標反射率の分布

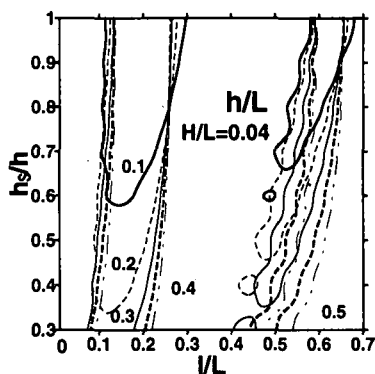


図-10(d) 一重スリット堤の目標反射率の分布

に含まれていれば l の決定に煩雑さが伴う。そこで l/L , h_s/h , h/L ($=h/l \cdot l/L$) を主要な変化パラメーターとして目標反射率を満足する条件を検討することにする。他のパラメーターの $2a/D$ および b/t は、両者ともに構造物自身に関係し、施工段階で考慮できる量であると考えられる。また D/l は消波室幅に関連するが、消波室幅決定後に $2a/D$ を調整することにより定めることが可能である。

4.2 最適構造諸元の決定フロー

前節に述べた立場から、 $H/L=0.01$ および $0.02, 0.03, 0.04$ の条件に対して、縦軸に h_s/h 、横軸に l/h ととり、 h/L をパラメーターとした二重スリット堤の目標反射率の分布の図を作成し、図-11(a)～(d)に示した。また、一重スリット堤に対しても同様の図を作成し、図-10(a)～(d)に示した。ただし、ここでの構造物条件は、感度分析の結果良好な消波効果を示すことが明らかになった b/t の小さな（扁平な）柱体平面断面をもつものとしている。また、一重スリット堤についても、消波効果が良いと考えられる断面を採用した（表-1 参照）。なお、いずれの図においても、曲線群の内側領域で目標反射率が満足されている。

これらの図を用いた決定フローは以下のようにまとめることができる。

- 1) 所与の自然条件の下で、長周期側の周期を満足する消波室幅の決定
- 2) 短周期側の周期が一重スリット堤で満足されるかどうかの検討
- 3) 満足されない場合、二重スリット堤として h_s/h の決定
- 4) 他の諸量 ($2a/D$, h/l , b/t) の最終決定あるいは確認
いまここで、一例として $T=10$ 秒, $L=92.3$ m, $H=1$ m ($H/L=0.01$, $h/L=0.11$) および $T=4$ 秒, $L=24.6$ m, $H=1$ m ($H/L=0.04$, $h/L=0.41$) の複数の波浪条件の下で目標反射率を満足する最適構造、諸元の決定法について具体的に考察してみる。

- ① 所与の条件より、長周期相当の $H/L=0.01$ であるので、一重スリット堤としての適否を図-10(a)より検討する。 $h/L=0.1$ の条件より、 $h_s/h=0.5$ とすれば最小の $l/L=0.08$ が求まり、それより $l=7.4$ m が求まる。一方、図-10(d)によれば、 $H/L=0.04$, $h/L=0.4$, $h_s/h=0.5$ の条件で $l/L=0.23$ まで目標反射率が満足

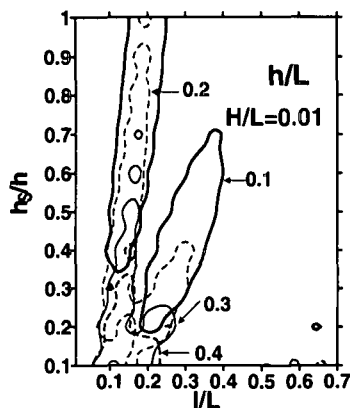


図-11(a) 二重スリット堤の目標反射率の分布

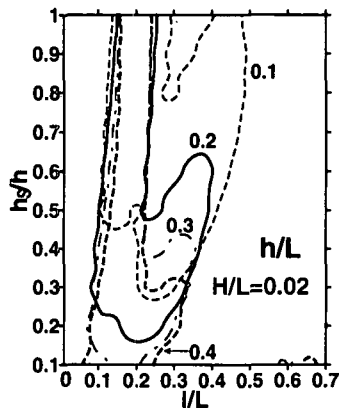


図-11(b) 二重スリット堤の目標反射率の分布

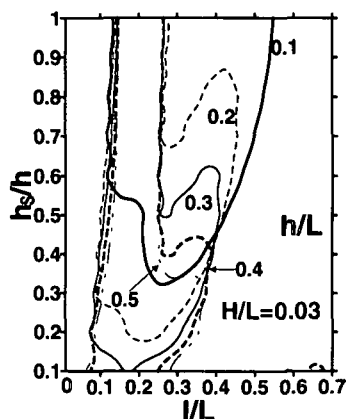


図-11(c) 二重スリット堤の目標反射率の分布

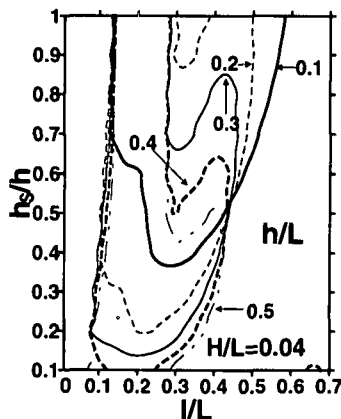


図-11(d) 二重スリット堤の目標反射率の分布

されるが、この値は、短周期側の条件から求められる $l/L = 7.4/24.6 = 0.3$ よりも小さく、要求条件は満足されていないで、二重スリット堤が必要となることがわかる。

- ② ①と同様にして、図-11(a)より、 $H/L = 0.01$, $h/L = 0.1$ の条件の下で、 $h_s/h = 0.5$ とれば最小の $l/L = 0.1$ を決定することができ、 $l = 9.2$ m が求まる。一方、図-11(d)によれば、 $H/L = 0.04$, $h/L = 0.4$, $h_s/h = 0.5$ の条件で $l/L = 0.43$ まで目標反射率が満足されるが、この値は短周期側の条件から求められる $l/L = 9.2/24.6 = 0.37$ よりも大きく、要求条件が満足されていて、二重スリットとしての断面が決定されたことになる。

5. まとめ

著者らによる二重スリット堤の反射率の理論解析結果を整理あるいは再計算し、最適構造諸元を決定する方法を提案した。建設コストの観点から重要なパラメータを

陽的に取り込むことで構造諸元を決定することができ

る。本研究の端緒は合田良実横浜国大名誉教授からの懇切な示唆によるところがきわめて大きい。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 萩原運弘 (1989): 多重スリット型構造物による波浪制御効果と作用波力の特性に関する研究, 大阪大学学位論文。
- 角野昇八・仲田義弘・藤原隆一 (1993): 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。
- 角野昇八・堀崎禎郎・原山之克 (1999): 消波室内水深を浅くした複数列スリット壁直立消波工の消波機能-BIM 解析一, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 671-692。
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 389-393。
- Kakuno, S., Y. Shiozaki, Y. Harayama and G. Tsujimoto (2000): Wave reflection from a double slit-wall breakwater with raised bottoms, Hydrodynamics 4th, pp. 687-692。