

直立消波ケーソン堤の反射率算定に対する VOF 法の適用性

小竹 康夫*・松村 章子**・藤原 隆一***
高橋 重雄****・磯部 雅彦*****

1. はじめに

直立消波ケーソン堤は、直立壁前面に遊水室とスリット壁を有し、低反射で耐波安定にすぐれた特長をもつ構造物で、内湾で波浪の比較的厳しくない海域の防波堤や護岸として数多く建設されている。近年では、さらに外海の波浪の厳しい場所にも建設されるようになっており、ケーソン式混成堤と共に我が国の主要な防波堤形式の一つとなっている(高橋, 1997)。

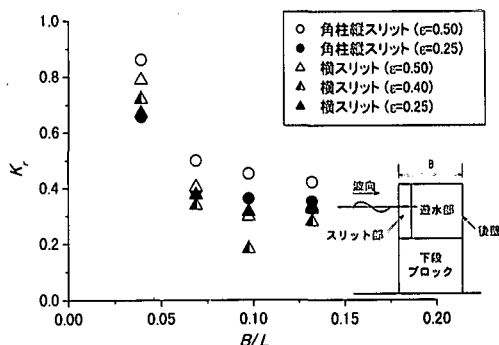
直立消波ケーソン堤に関する研究は非常に多く、その基本的な特徴はかなり分かっている。例えば谷本・吉本(1982)らの研究では、反射率に影響する構造諸元のうちの主要なものは遊水室の幅とスリット壁の開口比(開口率)および深さであり、開口比が 0.25~0.40 程度で反射率が極小値となることが示されている。また、波長に対する遊水室幅の比である相対遊水室幅は 0.1~0.2 程度を用いるのが良いとされている。

しかしながら、具体的な設計においては、構造諸元を含めた設計法が確立していない。これまでは、水理模型実験や、既存の計算法(例えば谷本・吉本(1982)、角野ら(1988)など)を用いて、対象とする波浪に対する消波機能を算定して構造諸元を決定している。将来の海域構造物の設計法は、波や構造形状の違いを的確に反映することができ、より精度の高い設計法が求められており、波と構造物の相互作用を数値計算によって明らかにした設計法(蔣ら, 2000)が主流になるとと思われる(磯部ら, 1999)。

本研究は、VOF 法を用いた数値計算による直立消波ケーソン堤の設計を実用化することを目的としている。本報告では、特に反射率に関して、既往の実験値や計算結果と比較し、その適用性について検討する。

2. 直立消波ケーソン堤の水理模型実験結果

図一は、運輸省(現国土交通省)第四港湾建設局下関



図一 直立消波ケーソン堤の反射率測定実験結果
(運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所, 1982)

調査設計事務所(1982)が実施した、直立消波ケーソン堤(縦スリット、および横スリットケーソン)の実験結果を示すものである。横軸 B/L は相対遊水室幅で、 B はスリット壁の厚みも含んだ遊水室幅、 L はスリット壁前面の水深での波長である。遊水室幅 B は一定 ($=25$ cm) とし、周期 T を変える ($=1.12 \sim 2.01$ s) ことで、相対遊水室幅 B/L を 0.04~0.13 に変化させている。また、波浪は規則波を対象としており、波高 $H=5$ cm で一定である。

この実験では遊水室の下部が不透過の構造物になっており、スリット壁前面水深 d が 65.9 cm であるのに対し、遊水室内水深 d' は 15.9 cm である。スリット壁の開口比(開口率) ϵ は 0.25~0.50 に変化させた。

図から分かるように、 B/L が 0.1 程度で反射率は 0.3 程度とかなり低くなっている。また、スリットの構造や開口率 ϵ による差は比較的少ないが、 $\epsilon=0.4$ のときに $\epsilon=0.25, 0.5$ より全体的に小さな値となっている。

3. 数値計算法

(1) 数値波動水路の概要

本検討では「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)で開発した数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いるものとした。この方法は NASA-VOF に基づき、2次元非圧縮性流体運動の連続式(1)および Navier-Stokes 方程式をポラスモデルに基づいて拡張した式(2)~(3)を基礎方程式とし、自由表面の境界

* 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所水工研究室
** 正会員 東洋建設(株)鳴尾研究所水工研究室
*** 正会員 博(工) 東洋建設(株)土木設計部
**** 正会員 工 博 (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
***** フェロー 工 博 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

条件としては VOF 関数 F の移流方程式 (4) を用いる解析手法で、時系列での波動運動解析が可能である。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 t : 時間、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分、 ρ : 密度、 p : 圧力、 ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g : 重力加速度、 γ_v : 空隙率、 γ_x, γ_z : 水平、鉛直方向の面積透過率であり、 C_M を慣性力係数として $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M$, $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$, $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M$, R_x, R_z は多孔質体からの抵抗力であり、流速の 2 乗に比例する形でモデル化されている。

(2) 解析領域

図-2 に、今回数値波動水路で対象とした解析領域を示す。造波には造波ソースを用いた。また解析領域の両端にエネルギー減衰帯を設けた。これにより構造物や斜面等からの反射と造波位置や解析領域境界からの反射による多重反射を防止することが出来る。また、構造物設置位置から 1 波長沖側を反射率の検査断面とした。

計算条件は、先に述べた直立消波ケーソン堤の実験条件に対応させるものとした。なお、波浪条件やケーソンのサイズは模型スケールで記述されていたが、縮尺を 1/20 とみなして現地スケールで計算している。

(3) 格子分割

対象とする直立消波ケーソン堤は、スリット壁と遊水室を有する構造が特徴であり、これらをいかにモデル化するかが重要である。堤体部における格子分割の一例を図-3 に示す。数値波動水路は断面 2 次元を対象とするため、スリット壁の構造としては図に示すとおり、横スリット形式を仮定した。また、スリット壁の孔の部分は流体セルで、壁の部分は構造物セルで表現する方法を用いた。なお、スリット壁をポーラスボディで表現する方法についても検討したが、慣性力係数および抗力係数の特定が難しい。

水平方向の格子サイズは、通常の波浪伝播領域では、波長 L の約 1/80 を基準としている。しかし、スリット壁の厚さを 3 メッシュ以上で表すために、堤体位置では波長の 1/155~1/265 とした。また、格子サイズが 1/80 から

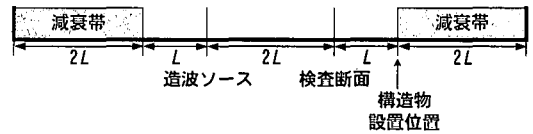


図-2 解析領域

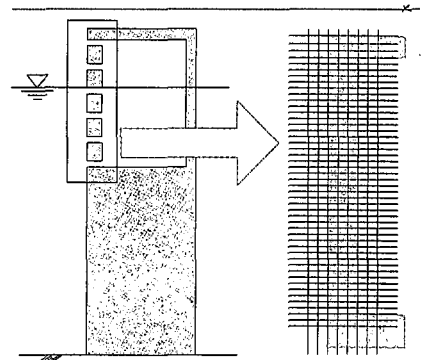


図-3 スリット壁の格子分割例 (開口率 0.25)

1/155~1/265 に急変するのを避けるために、1/1.1 倍あるいは 1.1 倍の等比級数により徐々に格子サイズを縮小あるいは拡大した。また、エネルギー減衰領域では、解析領域の外側に向けて、 $\Delta x/L = 1/19$ となるまで格子サイズを等比級数により徐々に拡大した。

一方、鉛直方向の格子は、スリット壁の孔を何メッシュで表すかが問題となる。スリット壁の孔を 1 メッシュにすると極端に反射率が低下した。これは格子が 1 メッシュしかないため、流速の鉛直方向成分を再現することができず、極端に大きな水平流速が遊水室内部に向けて発生し、過大な乱れを生じるためと考えられる。また格子サイズを小さくすることにより 3 メッシュにした場合は、ほぼ 2 メッシュの場合と同じ計算結果を得ている。ただし、3 メッシュでは、格子点数が増大するために、計算時間が多大に必要となる。したがって、鉛直方向は 2 メッシュで表現することとした。なお、格子サイズは波高 ($H = 1 \text{ m}$) の 1/5 とした。

(4) 反射率の求め方

反射率は、図-2 に示した検査断面を通過する波のパワーで定義することとした。波パワーの定義を式 (5) に示す。

$$W = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} u \cdot \left[p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) \right] dz dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 W は波パワーを示し、 T は波の周期、 η は水位、 p は動圧力、 h は水深である。

図-4 に検査断面における波パワーの時間変化の一例として、 $T = 6.0 \text{ s}$, $H = 1.0 \text{ m}$, $B = 5.0 \text{ m}$, $\varepsilon = 0.25$ のケースを示す。上から順に無堤時の通過波検定時、直立壁に波浪を作用させた完全反射の場合および直立消波ケーソ

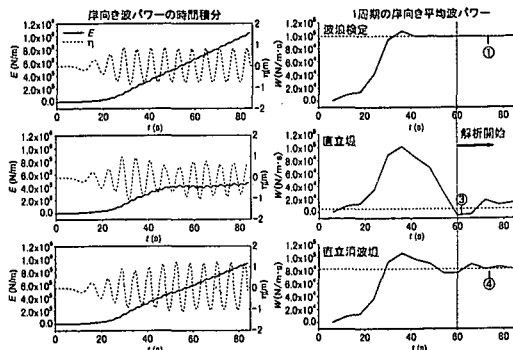


図-4 波パワー時間変化の一例
($T=6.0$ s, $H=1.0$ m, $B=5.0$ m, $\varepsilon=0.25$)

ン堤を対象とした場合であり、検査断面における波パワーの時間積分 E とその時間変化 (波パワー、具体的には 1 周期分の平均波パワー) である。これらの図に基づいて、反射率測定の手順を次に示す。

- ① 構造物なしの状態で通過波検定を行い、検査断面での波パワーを入射パワーと定義する。この際、堤体位置への波浪の到達状況などについても確認する。
- ② 構造物設置位置に直立壁を設置し、完全反射の条件で計算を実施する。
- ③ 理想的状態を仮定すると完全反射の条件で、直立壁からの反射波が検査断面を岸側から沖向きに通過する時刻以降の 1 周期分の平均波パワーが 0 となることから、計算結果でほぼ 0 となる時刻を求める。この例では、 $t=60$ s でほぼ 0 となっている。
- ④ 直立消波ケーソン堤を設置し、上で求めた時刻以降に検査断面を通過する波パワー (W_r) を求める。この波パワーと①の入射波パワーの差が直立消波ケーソン堤により反射された波パワーである。
- ⑤ 直立消波ケーソンにより反射した波パワー (W_r) と入射波パワー (W_i) の比の平方根を反射率 (K_r) として式 (6) で求める。

$$K_r = \sqrt{\frac{W_r}{W_i}} = \sqrt{\frac{W_i - W_t}{W_i}} \dots \dots \dots (6)$$

図-4 の直立消波ケーソン堤の場合、波パワーは構造物なしの通過波検定時の約 85% であり、反射率 $K_r=0.39$ となる。

4. 計算結果および考察

(1) 直立消波ケーソン堤の消波メカニズム

図-5 に直立消波ケーソン堤近傍の流速ベクトルを示す。また、スリット壁前面水位 η_f 、遊水室内の平均水位 η_c 、常に水中に存在するスリット孔における水平流速 u_p および遊水室内の水粒子運動に伴う運動エネルギーの時間変動を図-6 に示す。両方の図ともスリット開口率 $\varepsilon=$

0.25 で、相対遊水室幅の影響を比較するため、左から順に周期 $T=9.0$ s で相対遊水室幅 $B/L=0.05$ 、 $T=6.0$ s で $B/L=0.10$ および $T=9.0$ s で $B/L=0.11$ である。

図-5 では、いずれの場合にも、スリット壁前面と遊水室内で水位差が生じ、スリット孔に早い流速が発生しスリット壁付近を中心として大きな乱れが発生している状況を確認できる。なお反射率は、 $B/L=0.05$ のとき 0.6 程度、 $B/L=0.1$ のとき 0.2 程度で、 $B/L=0.1$ がほぼ最小の反射率を与えることが分かっているが、この図からは波の作用にあまり明確な差が認められない。

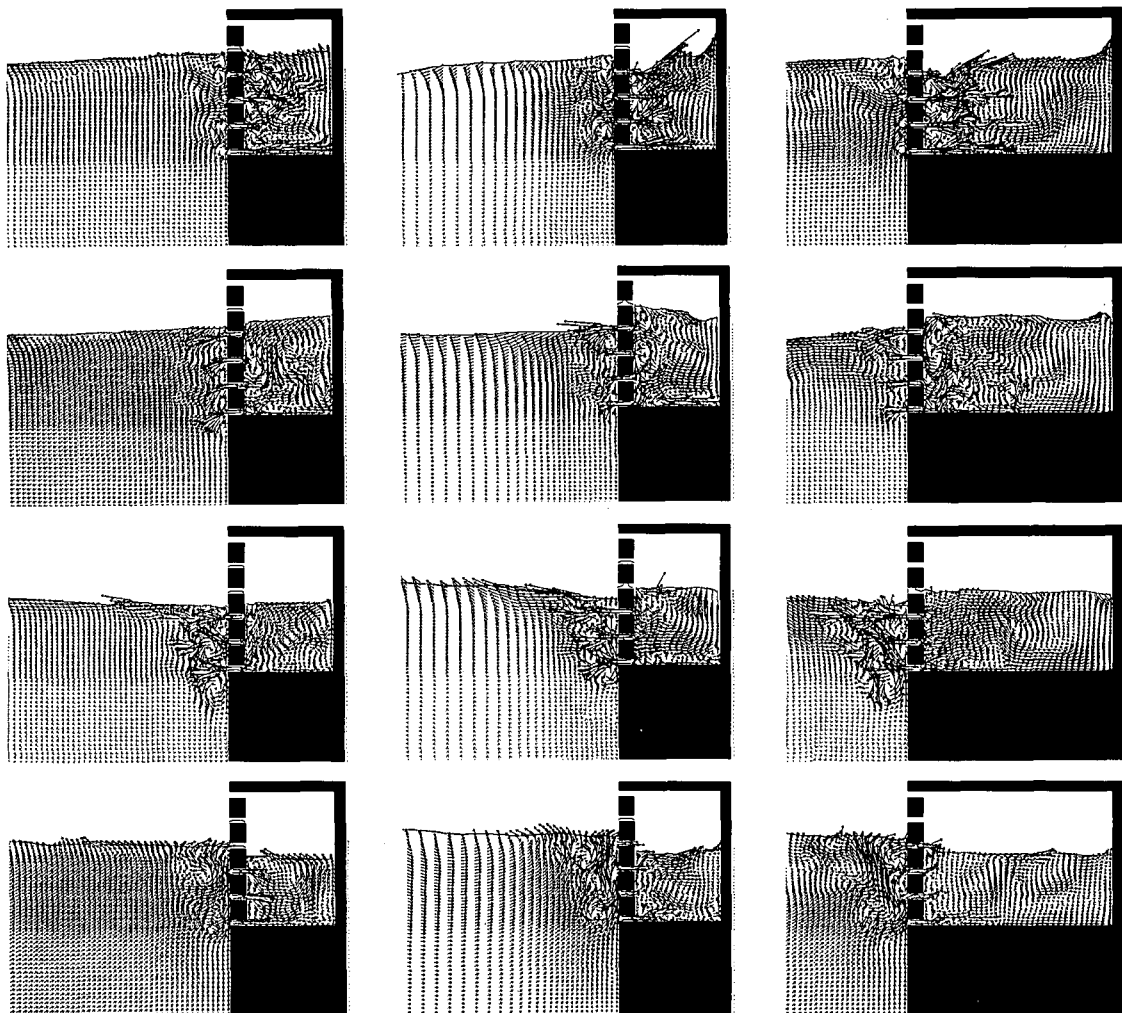
一方、図-6 では、ややスリット壁前面水位 η_f と遊水室の平均水位 η_c の平均的な高さに差が認められる。この原因は明確でないが、計算における気体セルの取り扱いの影響等が入っていると考えられる。その平均的な高さを差し引いた波形に対して見ると、前面の水位 η_f に比べ、 η_c は位相が遅れている。 B/L が 0.1 程度の場合に、約 1/4 周期の位相差を生じ、0.05 の場合には位相差がそれよりやや小さいことが分かる。また、いずれの図からも、前面の水位がピークとなる少し前に流速のピークが現れ、その後運動エネルギーがピーク値を示していることが分かる。さらに、入射波の峰がスリット壁に到達した位相での遊水室内水位が低い場合には、スリット壁を通過して遊水室内に水が流入し、エネルギーロスを生じるが、遊水室内の水位が高い場合にはスリット壁で反射が生じ易いといった現象を容易に把握することができる。

このように、数値波動水路の計算結果を用いることで、波と構造物の相互作用が詳細に検討でき、相対遊水室幅等の構造物の違いが、流速や水位などの違いにどう結びついているかが把握でき、合理的な設計に寄与することができる。

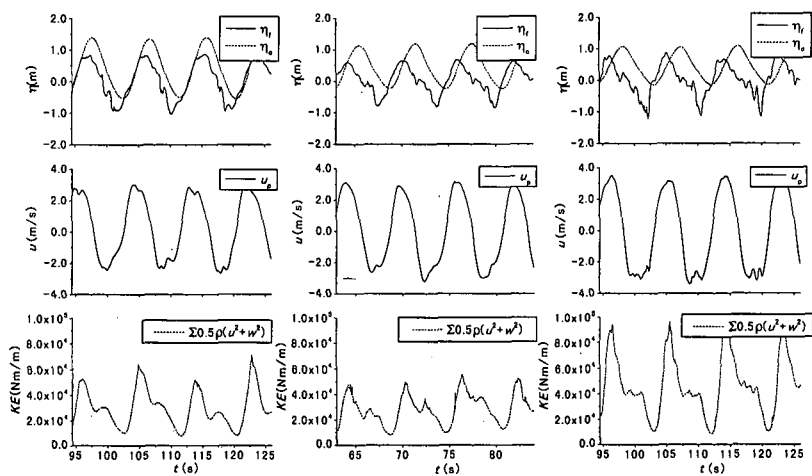
(2) 遊水室幅と開口率による反射率の変化

開口率による反射率の違いを図-7 に示す。図の横軸は相対遊水室幅であり、既往の実験結果と数値波動水路による検討結果を比較したもので、開口率 0.25 と 0.4 の場合について示している。

これらの図より、 B/L による反射率の傾向は、ほぼ実験値と計算値が同じであるが、開口率に関しては計算値と実験値に傾向的な違いが認められる。すなわち、実験結果の $\varepsilon=0.4$ のケースは計算結果の $\varepsilon=0.4$ より 0.25 に近く、実験結果の $\varepsilon=0.25$ は計算結果の $\varepsilon=0.15$ に近い。この理由は明確ではないが、実際にはスリット空隙部で縮流効果により見かけ上の空隙が小さくなるのに対して、数値波動水路では空隙を鉛直 2 メッシュで表現しているために、その効果を考慮することが出来ないためと考えられる。そこで、縮流係数 C_c を導入し、数値計算上は実質開口率 $\varepsilon' = C_c \varepsilon$ で与えることとした。今回の検討では C_c の最適値について詳細な検討はしていない



図—5 計算結果可視化の例

(開口率 0.25, $T=9.0\text{ s} \cdot B/L=0.05$ (左), $T=6.0\text{ s} \cdot B/L=0.10$ (中), $T=9.0\text{ s} \cdot B/L=0.11$ (右))図—6 スリット壁前面水位、遊水室内水位、スリット空隙水平流速および遊水室内運動エネルギーの各時系列変動の例
(開口率 0.25, $T=9.0\text{ s} \cdot B/L=0.05$ (左), $T=6.0\text{ s} \cdot B/L=0.10$ (中), $T=9.0\text{ s} \cdot B/L=0.11$ (右))

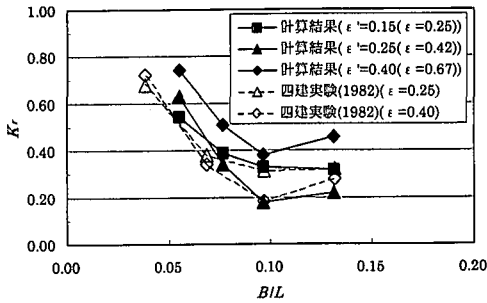


図-7 開口率による反射率の変化

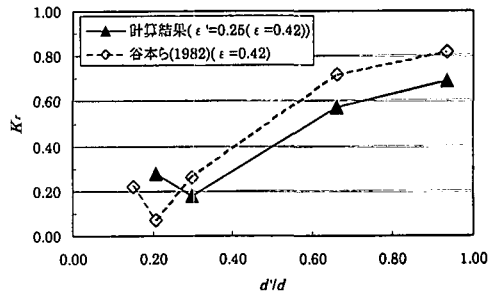


図-9 遊水室内の水深による反射率の変化

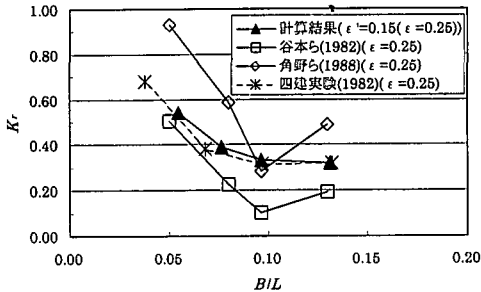


図-8 相対遊水室幅による反射率の変化

5. おわりに

数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて直立消波ケーソン堤の反射率を求める手法について検討を行った。その結果、反射率の実験結果や既存の計算法とこの方法による計算結果は比較的良好に一致する事が分かった。また、構造諸元を変化させた場合の反射率の違いも実験同様に確認することが可能である。今回の検討では横スリット壁を対象にしたが、種々の孔の形状に対してもその縮流係数などを考慮することによって、この計算法が適用できると考えられる。なお、今後は不規則波を対象とした検討を行うとともに、耐波構造物としての機能性および安定性を総合的に評価するためには、越波や伝達波、あるいは構造物に作用する波圧についても検討していく必要が有る。

謝辞：本研究の一部は「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」の活動の一環として行われました。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・髙山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所 (1982): 直立消波構造物の消波特性について—水理模型実験報告 (断面実験) 一, 31 p.
- 角野昇八・小田一紀・重松孝昌・芳田利春 (1988): 広周波数帯にわたって低反射機能を有する直立消波工の開発, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 557-561.
- 蔣 勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦 (2000): 波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 51-55.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2001): 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究開発, 沿岸開発技術研究所 (印刷中).
- 高橋重雄 (1997): 新構造防波堤とその設計, 1997 年度 (第 33 回) 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会海岸工学委員会・水理委員会, B-5-1-B-5-20.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技術研究所報告, 運輸省港湾技術研究所, 第 21 巻第 3 号, pp. 43-77.

が、この横スリットの実験結果の範囲では、 $C_c=0.6$ 程度を与えることにより数値波動水路を用いた結果は実験結果を比較的精度良く再現している。

また、図-8 は既往の研究 (谷本・吉本 (1982), 角野ら (1988)) を基に開口率 0.25 の場合の反射率を算定し、比較したものである。この図に示した数値波動水路の結果は実質開口率 $\epsilon=0.15$ ($C_c=0.6$) とした場合のものである。既往の研究による計算値と数値波動水路の結果の傾向は良く一致している。ただし、数値波動水路に比べて谷本ら (1982) の結果はやや小さく、角野ら (1988) の結果は大きくくなっていることが分かる。

(3) 他のパラメタの影響

図-9 は遊水室内の水深 d による反射率の変化を示したもので、横軸は遊水室内相対水深 d/d である。図には谷本らの計算結果も示しており、両者は近い傾向を示している。この時、遊水室内水深が小さくなると、消波対象となる波長も短くなることに着目すると、反射率を最小にするための遊水室幅も小さくすることが出来る事が分かる。合理的な設計の観点から、遊水室幅を狭くすることは有利であり、数値波動水路は設計の合理化に対しても有効な手段といえる。

その他のパラメタとして、波高の影響を検討したところ、波高の増大に伴って反射率もやや増大する傾向が認められるが、その影響はかなり小さいことが分かった。