

波動による海水交換を目的としたスリット付 2重鉛直平板堤体の流向制御手法について

A STUDY ON CURRENT DIRECTION CONTROL METHOD OF SEAWATER EXCHANGE BY DOUBLE VERTICAL WALLS WITH HORIZONTAL SLIT

折橋恒春¹・笠井康裕²・森 信人³・角野昇八⁴

Tsuneharu ORIHASHI, Yasuhiro KASAI, Nobuhito MORI and Shohachi KAKUNO

- | | | | |
|-------------------|------|-----------|-----------------------------------|
| ¹ 正会員 | 工修 | 五洋建設株式会社 | 大阪支店 (〒530-0001 大阪市北区梅田2-5-25) |
| ² 学生会員 | | 大阪市立大学大学院 | 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138) |
| ³ 正会員 | 博(工) | 大阪市立大学大学院 | 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138) |
| ⁴ フェロー | 工博 | 大阪市立大学大学院 | 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138) |

Recently many seawater exchangeable breakwaters have been constructed for improvement of seawater quality in port and inner harbor. A seawater exchangeable breakwater composed of vertical walls and slits is one of geometrically idealized shape of it. However due to the complex flow field including large scale vortex around the walls, the mechanism and flow pattern of seawater exchanging are not clear. In this study, a series of numerical simulations using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation with free surface is performed to simulate flows around the double vertical walls with slits in two-dimensional domain. The prototype design to control the current direction geometrically controlled large-scale vortex is proposed based on the numerical results. The validity of the numerical simulation and effectiveness of current control are verified by comparing with the hydraulic model tests.

Key Words : seawater exchangeable breakwater, current direction control,
double vertical walls with slit, large scale vortex

1. 緒 言

近年、内湾や港などの閉鎖性海域の水質悪化問題を解消するために海水交換型防波堤の建設が多くなっている。波動運動によって海水交換を行うことを目的とする海水交換型防波堤は、堤内に設けた遊水部内外の平均水位差を利用して外海から港内へ海水を導入する方式¹⁾と堤体内水平開口部周辺に波動運動によって誘起させられた渦流を利用した方式^{2,3)}に大別される。前者の方式では、平均水位差を発生させるために、堤体前面に潜堤を設けたり堤内に衝立を設置するなど、堤体の大型化や構造の複雑化を招く問題がある。一方、後者の渦流を利用した手法については、堤体構造が簡素化できるものの強い乱れが生じる複雑な流況下での問題であるため、平均流の発生機構について論じられた例も少なく、その最適形状を決定する設計手法が構築されていない。後者の渦流を利用した手法について、折橋ら(2004)³⁾は水深中央部に水平スリットを有する2重鉛直平板列において、平均流の発生を確認し、その流向を決定づける要因は、遊水部に発生する渦の定在状況に関連があることを示している。

しかしながら、2重鉛直平板列で発生する平均流の流向や流量の制御手法については明確ではない。

そこで、本研究では2重鉛直平板列で発生する平均流の流向および流量の制御手法を検討し、その妥当性を数値波動水路と水理模型実験によって確認した。

2. 数値計算概要および水理模型実験

(1) 数値計算手法

本研究では、2次元非圧縮性粘性流体に対する連続式とReynolds平均型Navier-Stokes方程式を基礎方程式とし、乱流モデルに高Reynolds型 $k-\varepsilon$ モデルを、自由表面解析モデルにVOF法を採用した数値波動水路(CADMAS-SURF⁴⁾)を用いて計算を行った。

(2) 計算条件

図-1に示すのは今回行った数値計算の計算領域である。模型サイズ、水深は後述する造波水路を用いた水理実験と同条件とした。計算格子間隔は水平方向 $\Delta x=0.05$

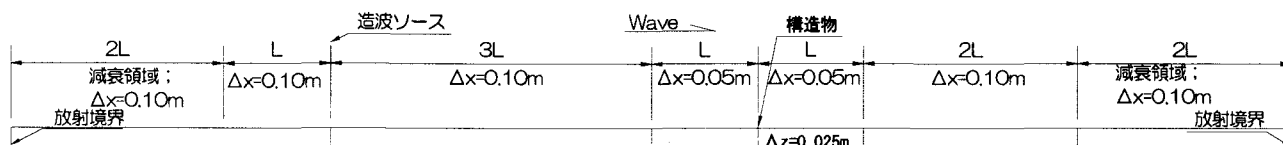


図-1 計算領域図

～0.10mとし、構造物近傍は格子間隔を密にした。鉛直方向の格子間隔は全て $\Delta z=0.025\text{m}$ とした。スリット部の鉛直方向の空間分割数は4とした。造波方法としては、Stokes波第5近似解の造波ソースを用い、解析領域の両端にはSommerfeldの放射境界条件を設け、そこから2波長分のエネルギー減衰帯を設けた。差分法にDONOR-0.2, F値フリー、他の境界条件はスリップとした。データ出力は $T/100$ 間隔(T :入射波の周期)とし、平均流速の算定は、造波後5波程度経過後の波動場が定常になった5波分の平均とした。波浪条件は、周期 $T=1.8\sim 5.1\text{s}$ 、波高 $H=4.5\sim 12.6\text{cm}$ の規則波とし、波形勾配は $H/L=0.01$ とした。波浪条件を表-1に示す。

表-1 波浪条件

周期 $T(\text{s})$	波長 $L(\text{m})$	l/L l :遊水室長	波高 $H(\text{cm})$	H/L
5.1	15.55	0.06	12.55	0.01
3.7	11.01	0.09	11.01	
3.2	9.36	0.11	9.36	
2.8	8.01	0.12	8.01	
2.5	6.98	0.14	6.98	
2.2	5.93	0.17	5.93	
1.8	4.48	0.22	4.48	

(3) 流向制御のための検討対象モデルについて

検討モデルを図-2に示す。まず既往の研究³⁾で検討された、水深中央に水平スリットを設けた2重鉛直平板形式(HCC)において遊水室内における渦と平均流の発生状況を確認し、その後、遊水室内に安定的な大規模渦の発生を目的として波の入射側と透過側で開口部設置高さをずらした形式(HUL)および流向制御を目的とした

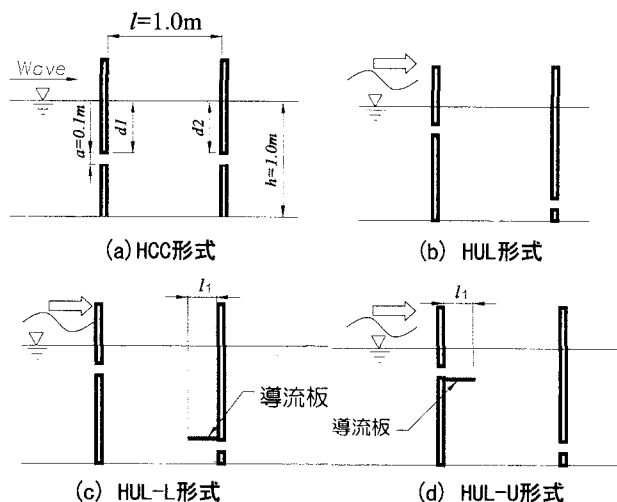


図-2 今回検討したモデルの一覧

導流板付き形式(HUL-U, HUL-L, HUL-U-L)について数値シミュレーションを行った。平均流速を造波後5波経過後の波動が定常になった10波分の平均値とし、流量をスリットを通過する流速フラックスの10波平均から算出した。表-2に模型諸元を示す。模型縮尺は、1/10～1/20程度を想定している。

表-2 模型諸元

Case No.	Model type	l (m)	a (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	l_1 (m)
A	HCC	1.0	0.1	0.50	0.50	—
B	HUL			0.94H	0.80	—
B1	HUL-U			1.45H	0.80	0.25
B2	HUL-L				0.80	0.25
B3	HUL-U-L				0.80	0.50

l_1 : 導流板長

(4) 水理模型実験

(a) 実験条件

実験は、長さ $L=50.0\text{m}$ ×幅 $D=2.0\text{m}$ ×高さ $H=1.5\text{m}$ の循環水路付造波水路で水深 $h=1.0\text{m}$ として実施した。入射波条件は、数値計算と同様に周期 $T=1.2\sim 5.1\text{s}$ 、波高 $H=2.6\sim 9.2\text{cm}$ の規則波とし、波形勾配が $H/L=0.01$ となるように設定した。実験模型は前項で示した数値シミュレーションの検討モデルと幾何学的に同様とした。

(b) 計測方法

岸側スリットの中央部に3次元超音波ドップラー流速計(アレック電子, ADV-lab)を設置し、流速の計測を行った。サンプリングタイムは0.04sとした。平均流速は、造波後5波程度経過後の波動が定常になった5波分の平均値とし、これより平均流速及び流量を求めた。

3. 結果および考察

(1) スリット付2重鉛直平板列の流況特性

図-3は水深中央部に開口部を有する2重鉛直平板列(HCC形式)における平均流発生特性と波浪制御特性を示したものである。縦軸はスリット通過流量比($Q'=Q/Q_0$, Q :スリット通過流量, Q_0 :進行波の質量輸送量)と波の反射率(K_r), 横軸は遊水室長(l)を入射波の波長(L)で無次元化した相対遊水室長(l/L)を示す。流量比は正值が波の進行方向である岸向きの流れを示し、負値は沖向きの流れを示す。進行波の質量輸送量は微小振幅波理論よ

り式(1)で算出した。図より、反射率の低下が見られ、

$$Q = \frac{1}{T} \int_h^0 \left\{ \int_0^{\pi} \bar{u}_i dt \right\} dz$$

$$= \frac{a^2 g^2 k^2}{4\sigma^3 (\cosh kh)^2} \sinh 2kh \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{u}_i = \frac{a^2 g^2 k^3}{2\sigma^3 (\cosh kh)^2} \cosh 2k(\bar{z} + h)$

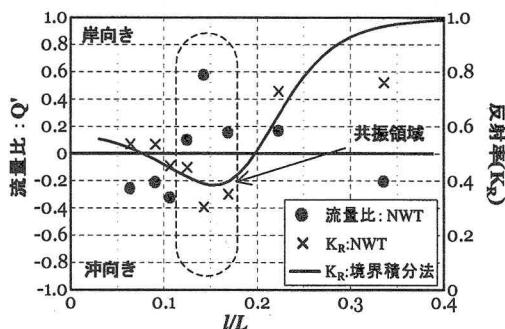


図-3 平均流の発生状況 (HCC形式)

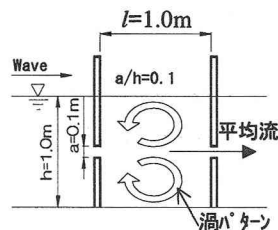


図-4 HCC形式における平均流の発生概念図

遊水室と入射波の共振域と考えられる $0.1 < l/L < 0.2$ 付近において岸向きの平均流が発生している。その他の範囲では沖向きの平均流が発生しており、入射波の周期によって流向が安定していない。岸向きの平均流が発生している状況では、遊水室内に図-4に示すようなパターンの渦が形成されていた。図-5は最も岸向きの平均流が発生している $l/L=0.14$ のケースにおける鉛直平板周辺の循環値の1周期平均を示す。循環値は式(2)により算定し、反時計回りを正、時計回りを負としている。単位は、 cm^2/s である。

$$\Gamma = \int \vec{v} \cdot d\vec{s} = \sum (u \Delta x + w \Delta z) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Γ : 循環値、 $\vec{v}=(u, w)$: 速度ベクトル、 s : 積分経路 (各計算格子周囲) を示す。これより遊水室内には、図-4に示した渦パターンのようにスリット設置高さ付近を境として水面側は反時計回り、底面側は時計回りの渦対が形成されている。図-6は、図-5に示す範囲で平板沖側、遊水室内部、平板岸側を開口部を境として水面側と底面側に分割した範囲の平均循環値の1周期間の推移を示したものである。この図からも波の1周期を通じて開口部を境に水面側と底面側に安定した渦対が発生し、この渦対が沖側開口部から岸側開口部へと平均流を誘起させる要因となっていることがわかる。図-7および図-8は沖側への平均流が発生している $l/L=0.06$ における1周期平均循環値と平均循環値の1周期間の推移

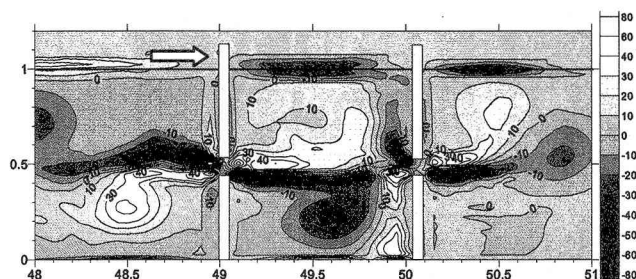


図-5 1周期平均循環値 ($l/L=0.14$)

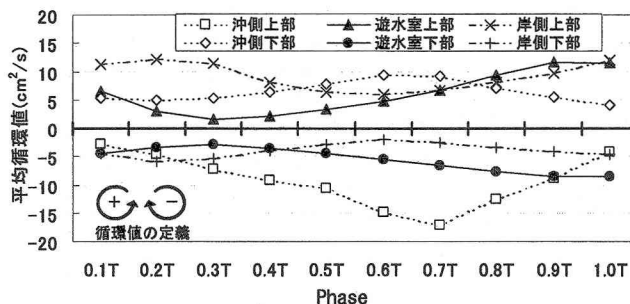


図-6 平均循環値の推移 ($l/L=0.14$)

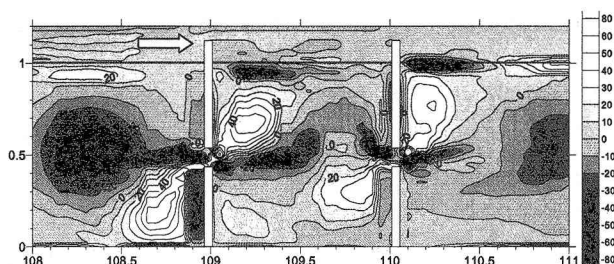


図-7 HCC形式の1周期平均循環値 ($l/L=0.06$)

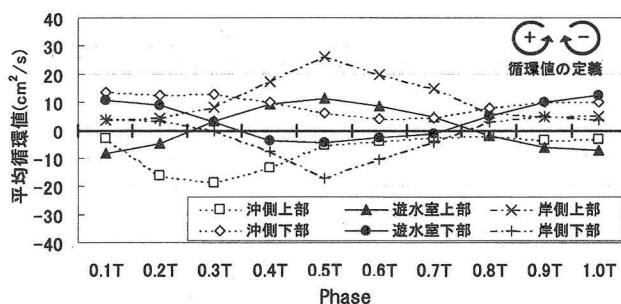


図-8 平均循環値の位相変化 ($l/L=0.06$)

を示している。図から開口部を境とした範囲で1周期を通じて循環値の正負が逆転していないのは、沖側の範囲のみであることがわかる。つまり、遊水室内及び岸側の範囲では、1周期を通じて渦対が安定発生せず、沖側開口部から岸側開口部への平均流の経路が形成されていないということが判断される。

以上より、遊水室内の渦の発生パターンにより平均流の発生方向が変化していることから、この遊水室内の渦流を制御することにより、平均流の流向制御が可能であると考えられる。

(2) 平均流の流向制御

前項で示したように開口部が水深中央にある形式(HCC)では、遊水室内に発生する渦対の定在状況が入射

波の周期によって変化するため、平均流の流向が安定しない。そこで、入射波の周期によらず遊水室内に安定的に渦流を発生させることによる平均流の流向制御手法について検討を行う。

まず、遊水室内に安定的かつ大規模な渦流を発生させることを目的として、図-2 (b)に示すような波の入射側と透過側のスリット設置位置を変えた形式 (HUL) を考え、数値シミュレーションを行った。図-9はHUL形式およびHCC形式の平均流発生状況を示す。縦軸は進行波の質量輸送量との流量比、横軸は相対遊水室長を示す。入射側と透過側でスリット設置高さをずらしたHUL形式では、 $l/L=0.17$ で平均流の流向が沖向きから岸向きへ転じるが、全体的に流量も少なく、HCC形式のような特定周期帯における流量の増加も見られなかった。図-10は、HUL形式の $l/L=0.14$ における1周期平均循環値である。HUL形式では全周期帯において図に見られるような時計回りの大規模渦が観察されたが、遊水室下部にスリットからの小規模な剥離渦の定在が見られた。このため、大規模渦が平均流の生成に寄与せず、結果的に図-5に見られるような平均流を誘起するような明確な渦の発生は見られなかった。

そこで、図-10の遊水室下部に見られたような小規模な剥離渦の発生を抑制し、遊水室全体に広がる大規模渦によって生成される安定的な一方向の渦流を利用し、平均流の流向を制御することを考える。図-2 (c), (d)に示すように開口部に長さ (l_1) が $l/4$ (l :遊水室長)の導流板を設置し、入射側と透過側の開口部の形状を非対称とした形式について、同様に数値シミュレーションを行った。図-11に導流板の無いHUL形式、導流板を入射側開口部に設置したHUL-U形式、透過側開口部に設

置したHUL-L形式の平均流の発生状況を示す。また、平均流発生機能の比較として、一般的な海水交換型防波堤の形式である導水管式(図-12)についても計算を実施した。入射側に導流板を設置したHUL-U形式では、全周期帯において岸向きの平均流が発生し、透過側に導流板を設置したHUL-L形式では沖向きの平均流が発生している。流量に関しては、HUL-U形式、HUL-L形式ともに最大で進行波の質量輸送量の80~90%の流量

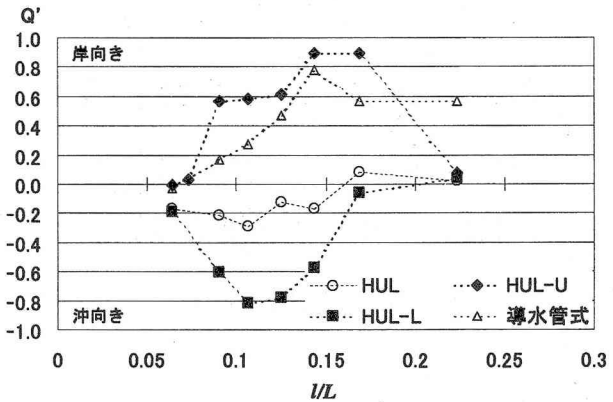


図-11 水平板付スリット構造物の平均流と入射波長の関係

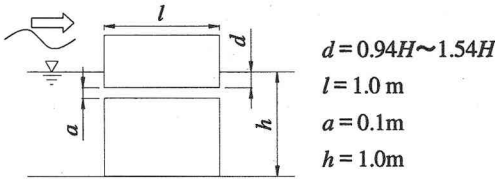


図-12 導水管式モデル図

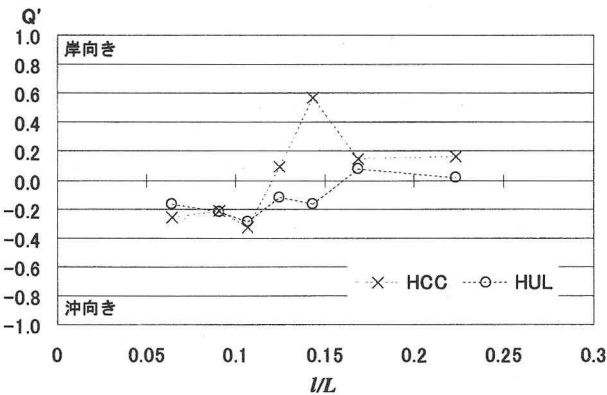


図-9 水平板なしスリット構造物の平均流と入射波周期の関係

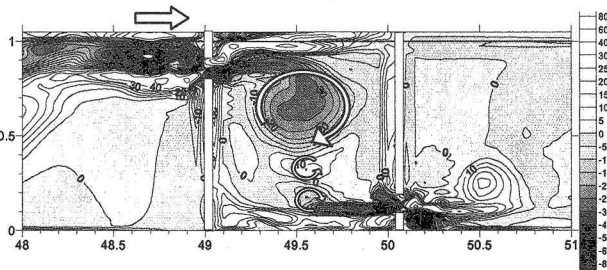
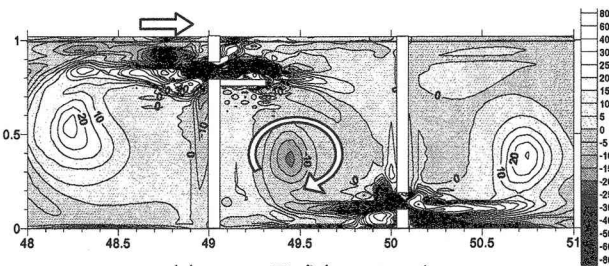
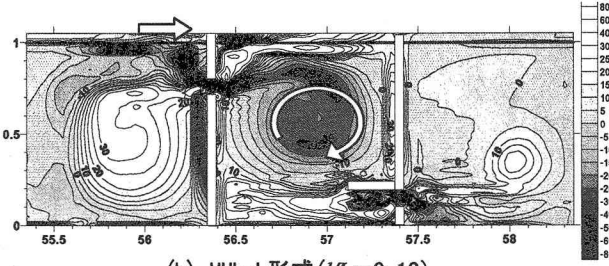


図-10 HUL形式の1周期平均循環値 ($l/L=0.14$)



(a) HUL-U形式 ($l/L=0.14$)



(b) HUL-L形式 ($l/L=0.12$)

図-13 水平板付モデルの1周期平均循環

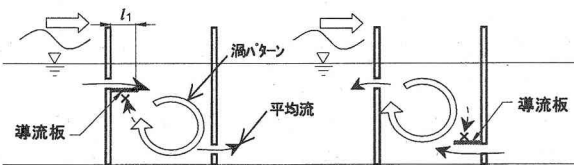


図-14 水平板付モデルの平均流発生概念図

を発生させている。HCC形式、HUL形式及び導水管式に対して、ほぼ全周期帯で上回る流量を発生させる結果となった。図-13は、HUL-U及びHUL-L形式の最大流量を発生させている周期帯付近の1周期平均の循環値を示している。同条件のHUL形式(図-10)と比べると、遊水室内下部の小規模の渦対は見られず、遊水室内全域で時計回りの渦流が発生していることがわかる。

以上の結果をまとめると、図-14に示すように入射側と透過側でスリット設置位置をずらすことにより大規模渦が生成され、一方の開口部に導流板を設置することによって非対称性を設けることで、平均流の流向を制御できることが示された。

(3) 導流板長による流量制御

平均流の流量に対する導流板長(l_f)の影響を確認するために、HUL-U形式の導流板長さを $l_f = 0, l/2, l/4$ と変化させて、数値シミュレーションを行った。図-15に示すのはその結果であり、導流板長が $l/4$ であるとき最も大きい流量が発生している。導流板の無いHUL形式では、図-10に示したように、遊水室内に明確な渦が形成されない。一方、導流板長が長い $l/2$ では遊水室の空間が狭くなり、渦の発生が抑制される。したがって、 $l/4$ のケースに比べて渦の規模が小さいため流量も小さく、また、渦の規模が小さくなるため、流量のピークが短周期側にずれることがわかった。

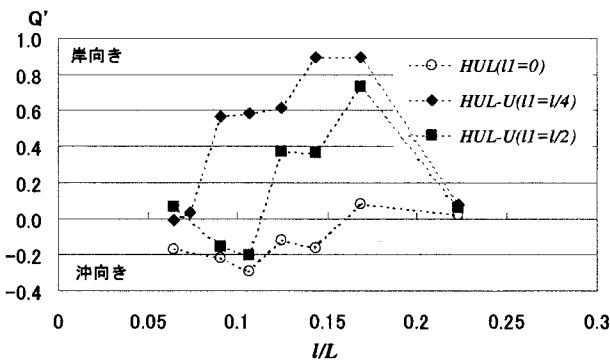


図-15 平均流量に及ぼす導流板長の影響

(4) 波浪制御効果

ここでは、導流板付きの2重鉛直平板列の波浪制御効果(反射率:Kr, 透過率:Kt)について考察する。スリットケーソンのように堤内に遊水部を有する構造形式では、相対遊水室長(l/L)が0.1~0.2付近で、波浪共振現象による反射率の低下が見られる。図-16は導流板付きの2重鉛直平板列(HUL-U形式、HUL-L形式)および導水管形式の反射率、透過率を示す。導流板付きの2重鉛直平板列は、図-3に示した水深中央部にスリットを設置したHCC形式と同様に $l/L=0.1\sim0.2$ で反射率が0.5以下と低い反射率を示している。また、図-11と比較すると、流量のピークと同じ波長・周期帯で反射率の極値も発生しており、反射率と流量は類似した波長・周波数特性を示している。一方、導水管形式はほぼ直立壁堤体と同様の構

造であるため、全周期帯で $Kr=0.9$ 程度の高い反射率を示している。透過率に関しては導流板付きの2重鉛直平板列は、 $l/L=0.1\sim0.2$ の範囲で反射率の低下に比べて透過率の上昇は顕著でなく、全周期帯で透過率が0.5を下回り、導水管形式と同等の透過機能を示している。これは、図-17に示すエネルギー減衰率($EL=1-Kr^2-Kt^2$)からもわかるように、導流板付き2重鉛直平板列では、水粒子が開口部を通過する際や遊水室内部に発生する大規模渦によって、波エネルギーが減衰しているものと考えられる。

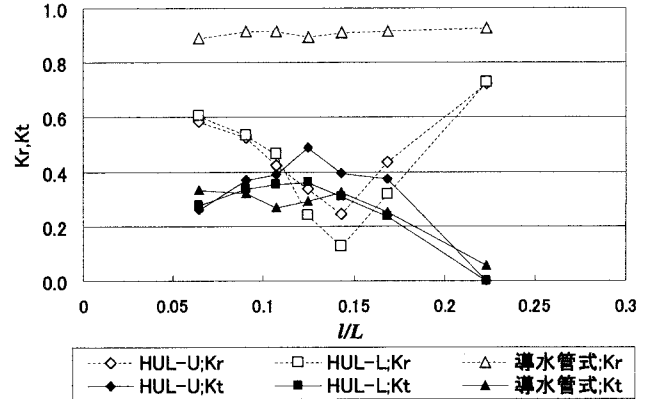


図-16 反射率(Kr)および透過率(Kt)と入射波長の関係

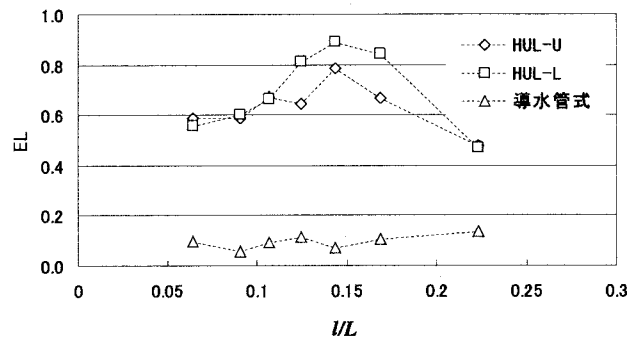
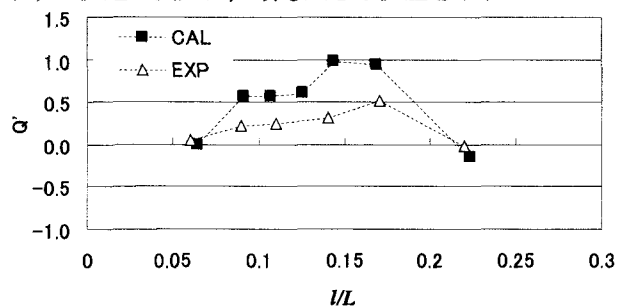


図-17 エネルギー減衰率と入射波長の関係

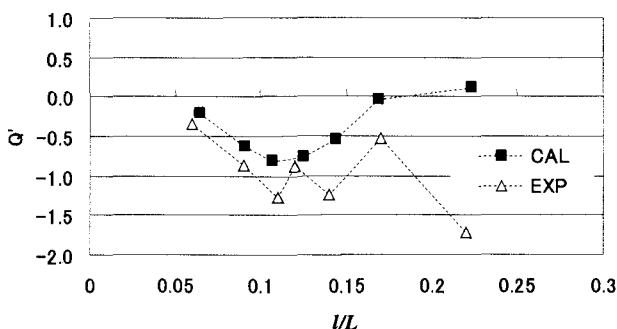
(5) 水理模型実験による平均流発生状況確認

最後に数値シミュレーションの妥当性を確認するために、水理模型実験を行い、流量および流速分布について比較を行った。図-18に示すのは、各スリット形式についての流量の入射波波長依存性を比較した結果である。図より、多少の差は存在するものの実験値と計算値ともに平均流量の入射波数特性は一致している。但し、HUL-U形式およびHUL-L形式では、実験値と計算値に多少の差が比較的大きな結果となっており、 $l/L=0.1\sim0.2$ で平均流量が増加する傾向がある。一般に、数値波動水路はスリットから離れた範囲では実際の流況を良く再現するが、スリット近傍は複雑な流況を示すため、このような非定常な乱れが卓越するような状況では数値計算の精度が低下する場合があることが報告されている⁵⁾。このため、スリット部での流量算定において両者は定性的には適合するが、定量的には差が生じる場合があるこ

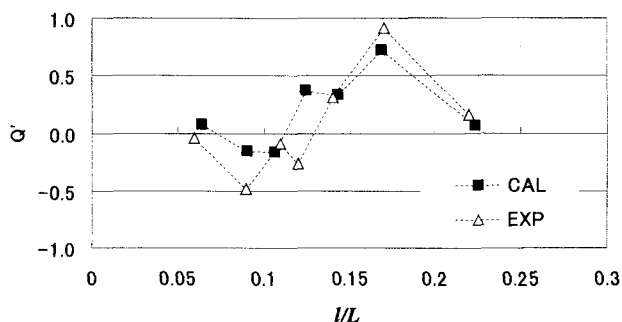
とも併せて報告されている。そこで、HUL-U形式について、スリットから十分離れた箇所において流速を測定し、平均流速の水平方向成分について数値計算と比較することによって妥当性を検証した。その結果を図-19に示す。流速の測定は、最も大きな流量を示す $l/L=0.14$ の



(a) HUL-U 形式



(b) HUL-L 形式



(c) HUL-U-L 形式

図-18 平均流量 Q について数値計算と実験結果の比較

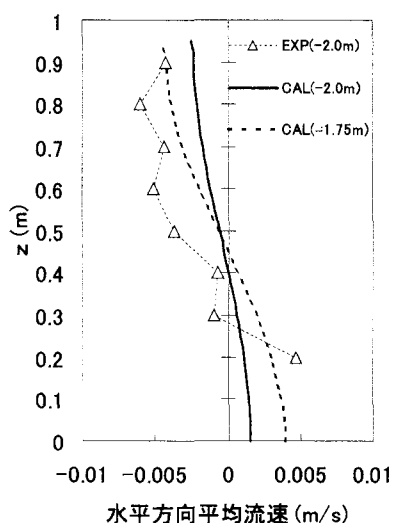


図-19 平均流速の鉛直分布についての実験と数値計算結果の比較 (HUL-U形式: $l/L=0.14$)

ケースで行った。流速の測定箇所は、スリットからの噴流の影響が少なくなる箇所とし、沖側の鉛直平板から沖方向に2.0m離れた地点で水深方向に8箇所とした。図には実験値と実験と同地点およびその近傍(鉛直平板から1.75mの地点)の数値計算結果を示す。縦軸は底面を原点とした鉛直高さ、横軸は平均流速の水平方向成分を示す。正值の流速は岸向きの流速を示し、負値は沖向きの流速を示す。実験および数値計算ともに水面($z=1.0$ m)付近で沖向き、底面付近で岸向きの平均流が発生することを示し、速度の分布および流速値も同程度を示し、妥当な結果であるといえる。紙面の関係上示さないが、HUL-L形式および導流板長の長いHUL-U-L形式では、実験結果と計算結果は比較的良好な一致を示している。

4. 結 言

本研究による結論をまとめると以下のように示される。

- ① 水平スリット付2重鉛直平板列において、波の入射側と透過側の開口位置を水深方向にずらし、導流板を設置することによって、波動による平均流の流向制御が可能である。
- ② 平均流は、相対遊水室長(l/L)が0.1~0.2付近で最も大きな流量を示す。
- ③ 導流板の長さが平均流の流量へ与える影響を検討した結果、導流板長: $l_1=l/4$ が最も大きい平均流を発生させる。
- ④ 導流板を設置した水平スリット付2重鉛直平板は、導水管形式の堤体に比し、波浪制御効果が高く(低反射)、ほぼ同等の海水交換機能を有している。

本研究では、流向および流量制御の基本的な手法を確認した。今後は、開口率、スリット設置位置などのパラメータ別の検討を行い、最適形状の設定や設計法の確立に繋げていく。

参考文献

- 1) 例えば 山本正昭・中泉昌光・間辺本文：潜堤付防波堤による海水交流工法の開発，第34回海工論文集，pp.675-679，1987。
- 2) 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭：渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について，海工論文集，第50巻，pp.806-810，2003。
- 3) 折橋恒春・恩地正憲・山野貴司・角野昇八：波動により平板スリット周辺に発生する一方向平均流とその誘起機構の解析，海工論文集，第51巻，pp.676-680，2004。
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF)，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，2001。
- 5) Orihashi, T., S. Kakuno, H. Kashima and N. Mori : Current and Vortex Characteristics Induced by Vertical Thin Wall with Horizontal Slit, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, Jeju, Korea, 2005. (投稿中)