

フラップゲート式可動波除堤の 透過特性に関する研究

STUDY ON TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF A FLAP GATE-TYPE BREAKWATER

新里英幸¹・木村雄一郎²・仲保京一³・藤田孝⁴

Hideyuki NIIZATO, Yuichiro KIMURA, Kyoichi NAKAYASU and Takashi FUJITA

¹正会員 工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

²工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

³正会員 日立造船鉄構株式会社 水門設計部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1-5-1)

⁴正会員 工修 日立造船株式会社 開発戦略室 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

This paper describes the wave's transmission characteristics of the flap gate-type breakwater fixed by support rods. As the structural features, the flap gates that opened the lower part are sloped in the opposite direction of incident waves. In this study, we investigated the measurement of transmission coefficient and reflection coefficient for the angle of slope of flap gate and the size of gate's lower opening by the water tank test, and calculated the wave motion and flow field around a gate by the numerical analysis by using MPS method. In an experiment, the experimental results of the case of sloped gate showed approximately equivalence about the reflection coefficient compared to the case of vertical gate. However, the energy dissipation rate increases and the transmission coefficient tends to decrease. In a numerical analysis, we confirmed that motions of eddy around a gate are generated. We concluded that the slant of the gate stimulated the generation of the vortex flow, and decreased the transmission coefficient by converting incident wave energy into the vortex.

Key Words : *flap gate type, hydraulic experiment, MPS method, transmission coefficient*

1. はじめに

従来構造の波除堤はコンクリートブロックや鋼管等により構築され、必要に応じて開閉することはできないため、少なからず船舶の航行や海水交換の妨げとなっている。これらの問題点の改善をはかるため、筆者らはフラップゲート式可動波除堤を提案している。著者らは、これまで津波・高潮用フラップゲート式可動防波堤を開発してきており、フラップゲート式可動波除堤(以下、フラップ式波除堤)とは、これを応用し波除堤にまで適用範囲を広げたものである。フラップ式波除堤は、図-1(a)に示すように平常時は海底に倒伏させておき、必要に応じて空気を供給することにより扉体に浮力を発生させ、図-1(b)のように浮上・起立させるため、平常時の船舶航行や海水交換の妨げとならず、使用時は背後域の静穏度が改善され、港湾荷役設備の稼働率向上が期待できる。

フラップ式波除堤では、波浪の伝達を低減すればよく、津波・高潮用とは異なり必ずしも航路を完全に閉鎖する必要はないことから、費用対効果の最大化をはかるため扉体下部に開口を持たせて設備重量および作用荷重の軽減を図っている。また、津波・高潮用とは異なり、扉体の起立に港内外の水位差を利用することができないため、扉体起立完了角度をやや港外側に傾斜させ、扉体に与える浮力と波力により所定の角度まで起立させた後、サポートロッドにより扉体角度を固定する方式をとっている。これにより、起立完了した後のフラップ式波除堤は従来の一重式カーテン防波堤と類似の構造物となるが、壁面が前面に傾斜している点が従来構造物とは異なる。また、フラップ式波除堤は可動構造であることを活かして、バース直近に設置することも想定している。この場合、底部開口量や扉体傾斜角を最適に設定するためには、底部開口からの波浪の透過特性を評価する必要がある。

本研究では、フラップ式波除堤の透過率と反射率に

対する扉体の傾斜角および下部開口の大きさによる影響を確認することを目的として、水理実験と数値解析の両面から検討を行う。実験では、2次元造波水槽を用いてフラップ式波除堤の模型に規則波を作用させた場合の透過率と反射率を測定する。解析では、フラップ式波除堤の扉体が海底面から水面上で起立するまでの間に、流体力が作用して動揺することが予想されるため、今後、波浪と扉体の連成解析を行うことを念頭に、計算格子を用いないLagrange解析法である粒子法を用いる。ここで、粒子法の一つであるMPS法¹⁾を使用して著者らが開発した2次元数値波動水槽²⁾を用いて、扉体に対する周辺波浪場を計算し、流況の可視化を行う。

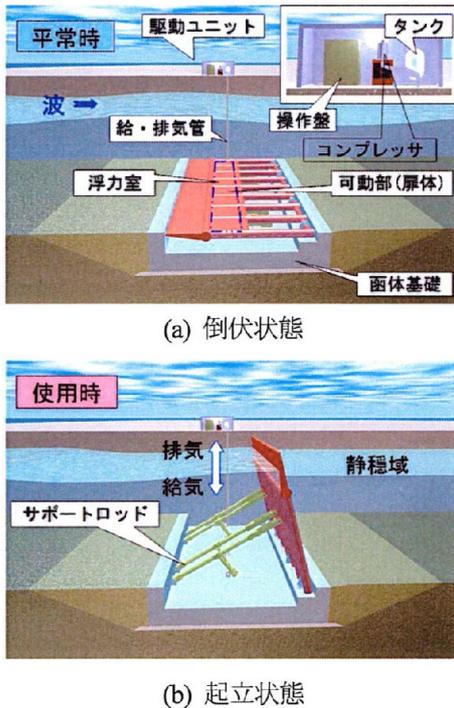


図-1 フラップゲート式可動波除堤の概略図

2. フラップ式波除堤

(1) 構造概要

フラップ式波除堤の構造概要を図-1に示す。フラップ式波除堤は可動部(扉体+サポートロッド)、扉体基礎、駆動ユニット(コンプレッサ、タンク、給・排気管、バルブ等)から構成される。扉体はコンプレッサにより扉体浮力室に空気を給気することにより浮上・起立し、自動的に固定される。

倒伏操作は、扉体固定解除後に排気・注水操作により行う。扉体起立完了時の傾斜角(以下、傾斜角) θ は設置海域に応じて最適な値になるよう設定し、扉体に作用する波力は、サポートロッドおよび扉体底部回転軸を介して扉体基礎から地盤に伝達される。扉体は起立完了時に引張荷重と圧縮荷重の両方を負担するサポートロッドによって固定されるため、波浪によって扉体が動揺することはない。

3. 水理模型実験

(1) 実験方法

実験で用いた造波水槽は、長さ50m、幅1m、深さ1.2mの2次元長水槽である。図-2に示すように、その水路の中心付近にアングルと壁面板で構成された模型を設置した。アングルの穴位置を変えることで、傾斜角 θ および扉体下部の開口を表す喫水水深比 d/h を変えることができる。模型の天端高はカーテン防波堤の天端高算定曲線³⁾を参考に越波しない範囲に設定した。実験では、フラップ式波除堤の起立状態を想定し、傾斜角 θ は 90° (直立状態)、 75° 、 60° の3種類、喫水水深比 d/h は0.50、0.67、0.73、0.80の4種類を対象とし、縮尺比は1/15とした。なお、以下の文中に示す数値は、実機換算値を示す。森平ら^{3,4)}によると、水面付近にのみ直立壁を設けたカーテン防波堤は、波の透過率 C_t と喫水水深比 d/h の関係から、水深波長比 h/L が0.2程度より大きい中間領域($0.05 < h/L < 0.5$)に適しているとのことより、本実験での波浪条件は、水深波長比 h/L が0.1~0.5程度になるように、5種類の波周期 $T=4s, 5s, 6s, 7s, 8s$ ($h/L=0.444, 0.296, 0.222, 0.178, 0.150$ に対応)の規則波を選択した。波形勾配は0.03とし、水深11mの海域を想定した。波高の計測には、入射波と反射波を分離するために、模型の前背面に2台ずつ計4台の容量式波高計を設置した。

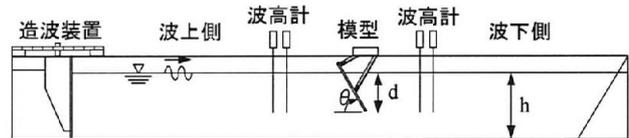


図-2 実験装置概略図

(2) 実験結果および考察

図-3~図-5は、傾斜角 $\theta=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$ における透過率 C_t の入射波周期による変化を示す。これらの図より、いずれの傾斜角および扉体下部の開口比を表す喫水水深比 d/h に対しても周期が長くなる程、透過率 C_t は増大することがわかる。また、いずれの傾斜角に対しても d/h が大きい程、すなわち扉体下部開口部が小さい程、透過率 C_t は低下する傾向がある。これは開口部が狭くなることで透過する波のエネルギーが減少するためと推測される。図-3より、例えば周期6sの波に対して透過波高を1/3に低減させようとするれば、傾斜角 $\theta=90^\circ$ の場合 d/h は0.8となり、ほとんど海底付近まで扉体の喫水を深くする必要がある。同様にして、図-4より、傾斜角 $\theta=75^\circ$ の場合であれば d/h は0.80と0.73程度、図-5より、傾斜角 60° の場合であれば d/h は0.80、0.73、0.67程度で良い。よって、扉体が垂直な直立状態よりも入射波の波上側に扉体をより傾斜させることで、透過波を低減することができると考えられる。図-6は、喫水水深比 d/h に対する水深波長比 $h/L=0.150$ と $h/L=0.444$ の各傾斜角の反射率 C_r を示す。図-7~図-10は、入射波周期に対す

る反射率 Cr とエネルギー逸散率 EL を示す。このとき $EL=1-(Cr^2+Ct^2)$ である。図-6より、 $h/L=0.444$ の場合、反射率 Cr はいずれの傾斜角 θ に対しても0.9を越えており、非常に大きな値を示している。一方、 $h/L=0.150$ の場合、反射率は d/h が大きくなる程増加する傾向にあり、概ね0.8未満である。また $\theta=60^\circ, d/h=0.8$ の場合、他の θ よりも反射率は小さい値を示している。このケースに関しては図-7より、エネルギー逸散率は他の θ よりも大きくなっていることを示している。よって扉体の傾斜角が 60° で海底付近まで喫水が深い、すなわち扉体下部と海底との距離である開口部は狭いとき、その近傍流場の水平流速は速くなることで、その扉体下部の渦流れを誘起しエネルギー逸散を促進させると考えられる。

図-7~図-10より、いずれの d/h のケースでも反射率 Cr は波周期 $7s$ のときに一旦低減ピークを示し、この条件下においてエネルギー逸散率 EL は極大となっている。中村ら⁹⁾も指摘しているが、この反射率の低下は何らかの逸散現象によるものと推測される。

表-1に傾斜角 90° の透過率 Cr と反射率 Ct の数値を基準にして、この 90° に対する 75° と 60° の場合の透過率 Cr と反射率 Ct の比率を示す。これにより、従来の一重式カーテン防波堤との違いを確認する。

喫水水深比 $d/h=0.80$ のとき、いずれの波周期 T に対しても 75° と 60° の場合の反射率 Cr は、ほぼ1に近接して 90° の場合の反射率とあまり差がないことを示している。一方、透過率 Ct は $4s$ 以外の波周期に対して 75° の場合において約4%~30%、 60° の場合において約20%~39%程度、 90° の透過率に比べて低減している。波周期 $4s$ に関しては、 75° と 60° の場合両方とも 90° の場合より、透過率は増加する傾向があり、特に 60° の場合は約70%程度

増加している。 $4s$ の波周期に対しては、透過率低減の面から考えると、傾斜角 60° は効果的ではない。

$d/h=0.73$ のとき、この場合もいずれの波周期 T に対しても 75° と 60° の場合の反射率 Cr は、ほぼ1~1.1に近接して 90° の場合の反射率とあまり差がない。一方、透過率 Ct は波周期 $4s$ で傾斜角 60° 以外に対して、 75° の場合において約4%~28%、 60° の場合において約18%~42%程度、 90° の透過率に比べて低減している。波周期 $4s$ で傾斜角 60° に関しては、31%程度透過率は増加している。この喫水水深比においても $4s$ の波周期に対しては、透過率低減の面から考えると、傾斜角 60° は効果的ではない。

$d/h=0.67$ のとき、この場合もいずれの波周期 T に対しても 75° と 60° の場合の反射率 Cr は、ほぼ1~1.1に近接して 90° の場合の反射率とあまり差がない。一方、透過率 Ct は波周期 $4s$ で傾斜角 60° 以外に対して、 75° の場合において約5%~32%、 60° の場合において約13%~49%程度、 90° の透過率に比べて低減している。波周期 $4s$ で傾斜角 60° の透過率に関しても、 90° の透過率とほとんど変わらない。よって、波周期 $4s$ に対して傾斜角 60° は 90° の場合とほぼ同等の反射・透過特性を有していると推測される。

$d/h=0.50$ のとき、波周期 $6s, 7s$ 、傾斜角 60° の場合の反射率は約20%程度、 90° の場合より大きい値を示している。それ以外の波周期 T に対する 75° と 60° の場合の反射率 Cr は、ほぼ1~1.1に近接して 90° の場合の反射率とあまり差がない。一方、透過率 Ct はいずれの波周期 T に対して、 75° の場合において約0%~50%、 60° の場合において約11%~55%程度、 90° の透過率に比べて低減している。

以上より、反射率に関しては、傾斜角 75° と 60° の場

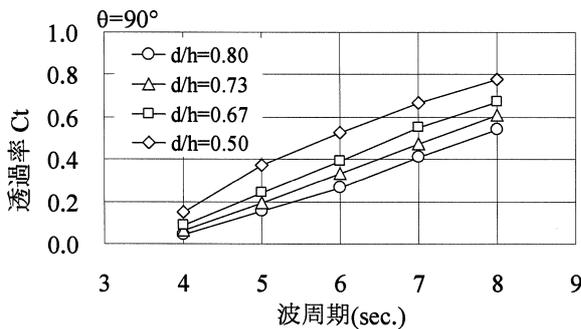


図-3 喫水 d による透過率の変化($\theta=90^\circ$)

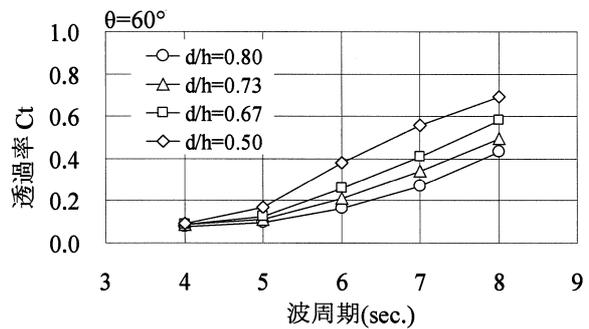


図-5 喫水 d による透過率の変化($\theta=60^\circ$)

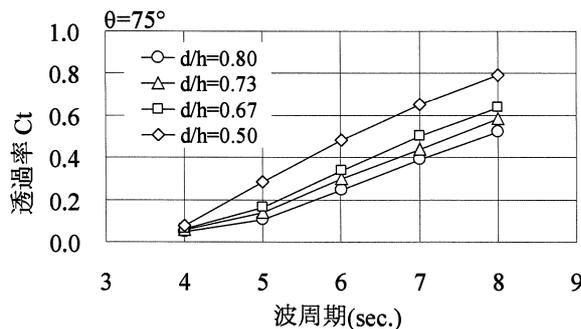


図-4 喫水 d による透過率の変化($\theta=75^\circ$)

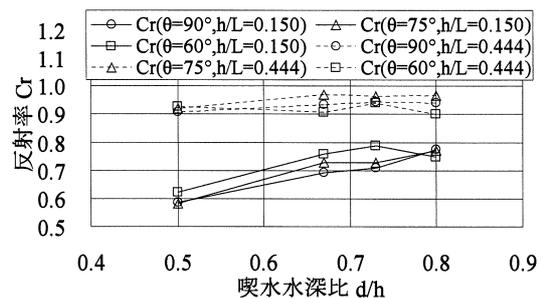


図-6 反射率と d/h の関係

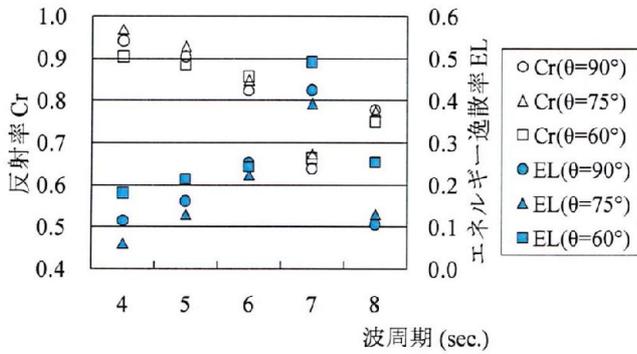


図-7 反射率Crとエネルギー逸散率ELの関係(d/h=0.8)

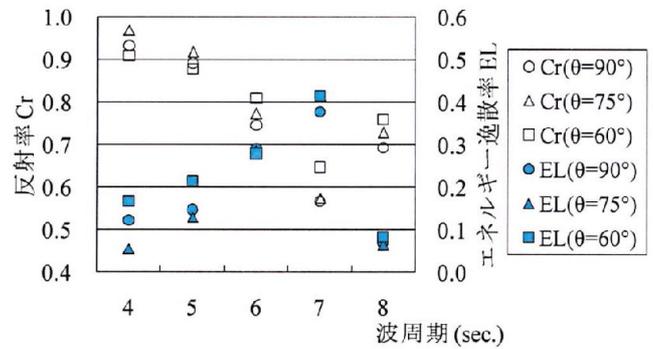


図-9 反射率Crとエネルギー逸散率ELの関係(d/h=0.67)

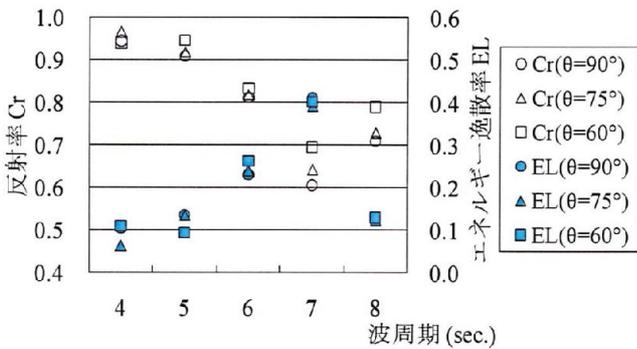


図-8 反射率Crとエネルギー逸散率ELの関係(d/h=0.73)

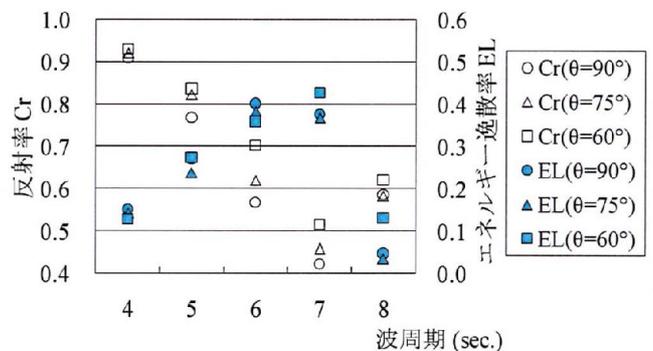


図-10 反射率Crとエネルギー逸散率ELの関係(d/h=0.5)

合は90°の場合とほとんど変わらないと考えられる。透過率に関しては、 $d/h=0.80, 0.73$ で4s以外の波周期に対して傾斜角75°と60°の方が傾斜角90°である直立状態よりも低減効果は大きく、傾斜角75°よりも傾斜角60°の方がより透過率を低下させることができる。また、 $d/h=0.73$ と $d/h=0.67$ の場合を比較すると、傾斜角90°に対する75°と60°の反射・透過特性は、ほぼ同等の傾向を示している。

表-1 傾斜角 $\theta=90^\circ$ の反射率と透過率に対する比率

d/h=0.80	Cr		Ct		d/h=0.73	Cr		Ct		
	T(s)	$\theta=75^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$		$\theta=60^\circ$	T(s)	$\theta=75^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$
	4	1.03	0.96	1.16	1.73	4	1.02	1.00	0.87	1.31
	5	1.03	0.98	0.70	0.62	5	1.01	1.04	0.72	0.58
	6	1.03	1.04	0.92	0.61	6	1.01	1.02	0.90	0.64
	7	1.06	1.04	0.95	0.65	7	1.06	1.15	0.94	0.73
	8	1.00	0.96	0.96	0.80	8	1.03	1.11	0.96	0.82

d/h=0.67	Cr		Ct		d/h=0.50	Cr		Ct		
	T(s)	$\theta=75^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$		$\theta=60^\circ$	T(s)	$\theta=75^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$
	4	1.04	0.97	0.73	1.03	4	1.02	1.02	0.50	0.59
	5	1.03	0.98	0.68	0.51	5	1.07	1.09	0.77	0.45
	6	1.04	1.08	0.86	0.66	6	1.09	1.24	0.92	0.73
	7	1.01	1.14	0.91	0.75	7	1.08	1.22	0.97	0.83
	8	1.05	1.09	0.95	0.87	8	0.99	1.06	1.01	0.89

4. MPS法による2次元波動場数値解析

(1) 解析条件

図-11に示すように、造波板粒子を水平に稼動させることによって造波することができる全長2mの断面2次

元の数値造波水槽に、波除堤を中間に固定設置した。この数値造波水槽は流体粒子・固定壁粒子・造波板粒子・扉体粒子から構成されている。この扉体粒子は、流体粒子と接する外側粒子2列および流体粒子と接しない内側粒子1列の計3列から成る。これは流体粒子と接する粒子は圧力を計算する際に流体粒子と同様に粒子数密度を計算するため、粒子数密度が過剰に低下した場合に扉体は自由表面と判定され、計算に不具合が発生する。よって、圧力を計算しない内側粒子を用意することで、粒子数密度の低下を防ぐことができる。

波浪条件は水理実験で使用した条件と同様に、5種類の波周期 $T=4s, 5s, 6s, 7s, 8s$ (実機換算値)で、波形勾配0.03の規則波である。また、傾斜角 θ は90°, 75°, 60°の3種類、喫水水深比 d/h は0.50, 0.67, 0.73, 0.80の4種類として、計60ケースについて解析を行った。解析で用いた全粒子数は個々のケースで多少異なるが約4300程度である。

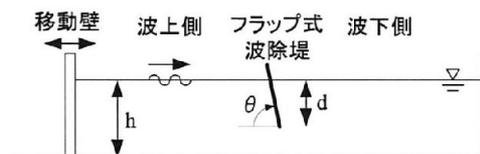


図-11 2次元数値造波水槽

(2) 解析結果および考察

解析結果における透過率 Ct の算出に関しては、入射波および透過波の波高は、波除堤前背面の水位変動の1波長分の領域を用いて空間平均している。これは中村

ら⁹⁾が波動場中の渦流れの観測結果に基づき流れの剥離やその発達した渦流れの影響する領域として堤体前後の $L/8$ (L :波長)までの領域を減衰波領域と定義しており、この領域は乱れ場により水面粒子の移動も激しいことが推測されることから、水位の空間平均を行う範囲を大きく取ったからである。図-12は水深波長比 h/L 毎の喫水水深比 d/h に対する透過率 C_t を示しており、傾斜角 $\theta=90^\circ$ の場合における本実験結果(点)、本解析結果(実線)および森平ら¹²⁾が直立カーテン防波堤($\theta=90^\circ$ に相当)の造波実験で取得した結果(点線)を表している。図より、本実験結果と解析結果はほぼ合致する結果を得ているのがわかる。また、 h/L の違いはあるが、森平らの結果と比較しても、本実験結果と解析結果は十分な精度を得られていることが確認できる。図-13は傾斜角 $\theta=60^\circ$ と 75° の場合における水深波長比 h/L 毎の喫水水深比 d/h に対する透過率 C_t について、本実験結果と解析結果

の比較を示している。図より解析結果と実験結果との一致度は良いことがわかる。

実験では周期 $7s$ のときに反射率は低減ピークを示し、この条件下ではエネルギー逸散率は極大となる結果が得られた。逸散現象としては、扉体の下端部から発生する渦流れ等が挙げられる。よって、図-14に喫水水深比 $d/h=0.80$ で傾斜角 $\theta=60^\circ$ の波除堤に対して波周期 $T=7s$ の入射波が進入する条件下で水路長 $0.6m\sim 1.4m$ の範囲内の粒子が形成する自由表面および粒子の流速ベクトルの瞬時流況分布を示す。図は入射波が到達し前面の水位が最小になった時刻から $T/8$ 毎を表している。また、流速ベクトルを表す図中の矢印の長さは流速の大きさを示している。いずれの t/T においても複雑な流場を形成しており、構造物周辺からの剥離流れ等も表している。ここで、波の山谷が到達する t/T に着目する。(A) $t/T=0/8$ では、波峰の谷の頂部が波除堤に作用してい

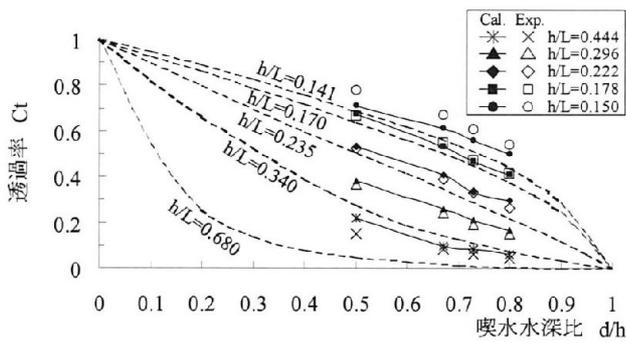


図-12 実験値と解析値の比較 ($\theta=90^\circ$)

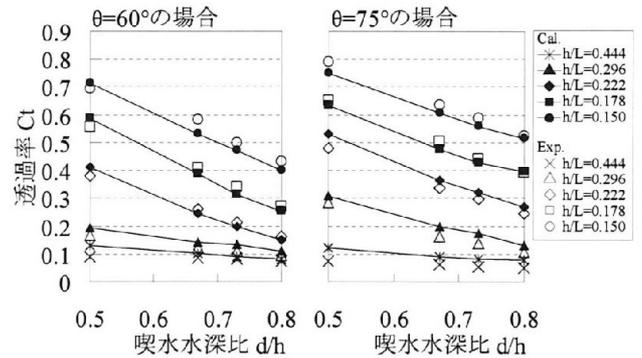


図-13 実験値と解析値の比較 ($\theta=60^\circ, 75^\circ$)

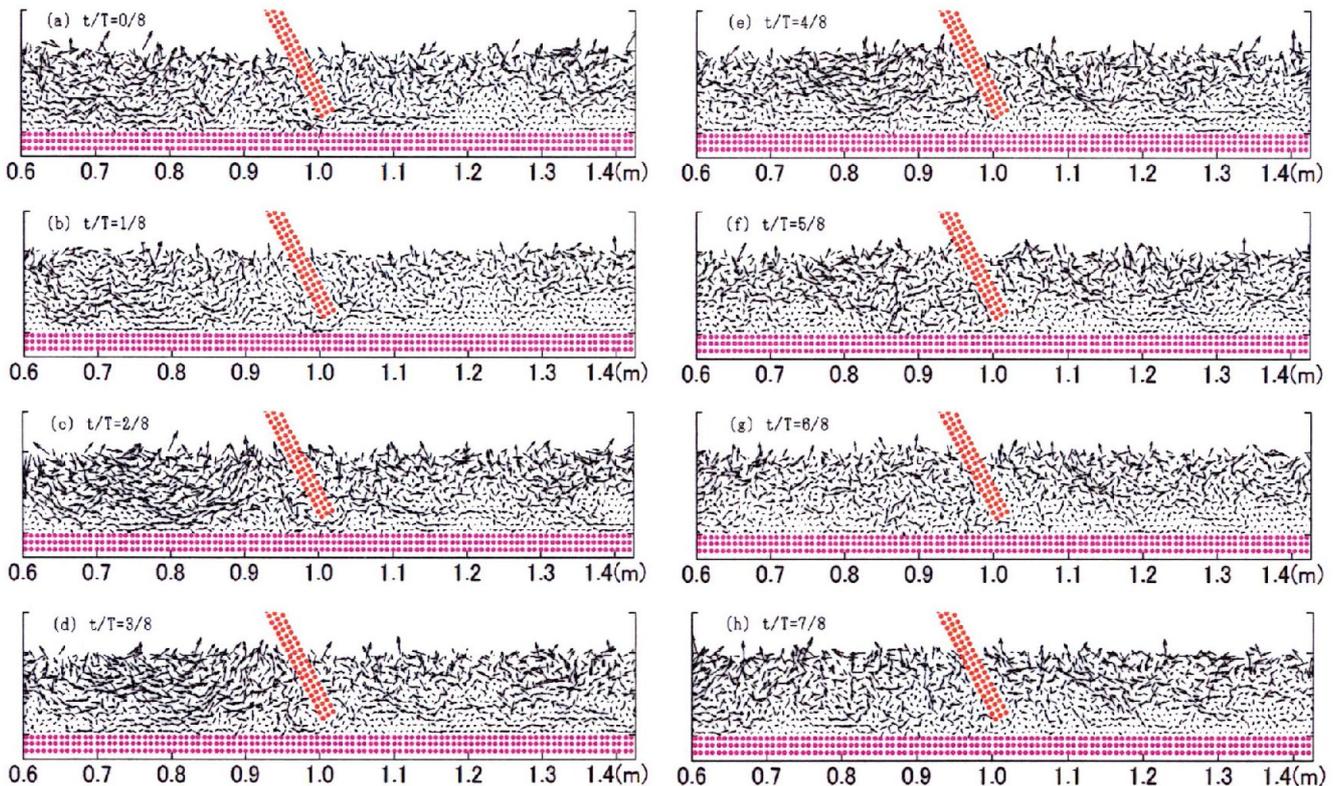


図-14 1周期における流速ベクトル ($d/h=0.80, \theta=60^\circ, T=7s$)

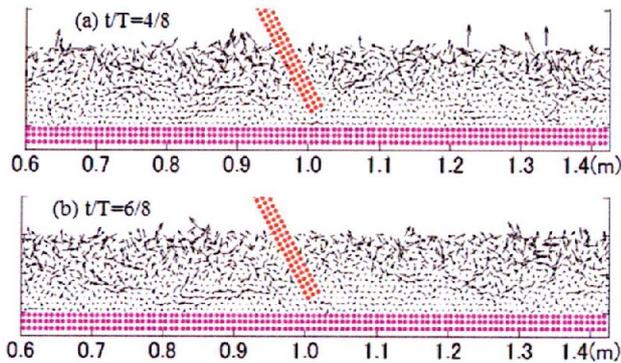


図-15 流速ベクトル($d/h=0.80, \theta=60^\circ, T=5s$)

る状態に相当し、波下側から開口部に流れる流速ベクトルが存在し、開口部を通過した流速ベクトルは波除堤の前面に沿うように斜め上方に流れる。波下側の波圧の低下により開口部へ向かう流れが形成されたと推測される。(B) $t/T=2/8$ では水面が水平になる時間帯で押波初動時に相当しており、波下側から開口部に流れる流速ベクトルと波上側の入射波の流れの流速ベクトルが横軸0.9mの波除堤中段で浅付近に集中して、水位上昇させるための上向きの流れになっているのがわかる。(C) $t/T=4/8$ では波峰の山の頂部が波除堤に作用している状態で、波上側および波下側から開口部に流れる流速ベクトルは確認できない。また、 $t/T=3/8$ のように波峰の山の頂部が作用する直前状態よりも流速ベクトルの大きさは小さい。(D) $t/T=6/8$ では水面が水平になる時間帯で引波初動時に相当する。押波による反射波の影響により、流場は複雑な様子を示している。横軸0.95mで波除堤前面の中断部付近において渦流の形成がわずかであるが確認される。実験では波周期7sよりも反射率は大きくエネルギー逸散率は小さい傾向を示した波周期5sに対する流速ベクトルの瞬時流況分布を図-15に示す。(E) $t/T=4/8$ では横軸0.9mの水面近傍の流速ベクトルは上向きに大きく開口部を流れる流速ベクトルは小さいのがわかる。(F) $t/T=6/8$ でも横軸0.8m~0.9mの範囲内の水面近傍の流速ベクトルは上向きに大きく開口部を出入りする流速ベクトルは小さい傾向を示す。また、今回の t/T の条件下では渦流の形成を確認できなかった。これより入射波はほとんど波除堤に遮断され波のエネルギーは水面近傍に集まり反射波のエネルギーに変換され、反射率は大きくなったと推測される。

以上より、水理模型実験でも波周期7sではエネルギー逸散率が増加する結果を得ていたが、波動が複雑な流れや渦流の運動に変換されることで、エネルギー逸散率が増大したものと考えられ、これらの影響により、透過率が低下する機構になっていると推測される。

5. まとめ

扉体が入射波側前方に傾斜するフラップ式波除堤を提案し、扉体起立時の透過特性について水理実験と数

値解析を実施した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- ① 反射率に関しては、傾斜角 75° と 60° の場合は傾斜角 90° の場合と大差ない。
- ② 透過率に関しては、 $d/h=0.80, 0.73$ で4s以外の波周期に対して傾斜角 75° と 60° の方が傾斜角 90° よりも低減し、傾斜角 75° よりも傾斜角 60° の方がより透過率を低下させる。
- ③ $d/h=0.73$ と 0.67 については傾斜角 90° に対する 75° と 60° の反射・透過特性はほぼ同等の傾向がある。
- ④ いずれの d/h のケースでも波周期7sの条件下では反射率が低減ピークを示しエネルギー逸散率は極大を表す。
- ⑤ MPS法に基づいた2次元波動場を表す数値解析による透過率の計算値は実験値と良く合致する。
- ⑥ 粒子の運動から波除堤周辺の波浪場の流況状態を確認することができ、今後、様々な傾斜角についても本手法で透過率の推定が可能であると考えられる。
- ⑦ 喫水水深比0.80での傾斜角 60° と傾斜角 90° を比較すると、実験から反射率の実験はほぼ同等な結果を得、傾斜角 60° の場合透過率が低減するのは、波動が複雑な流れや渦流の運動に変換され、エネルギー逸散率が増大したからである。

以上より、水理実験と数値解析の結果から傾斜した場合の傾斜角 75° と 60° の2ケースについて検証し、傾斜角 60° の方が入射する波の周期にもよるが、概ね透過波を低減できる特性を確認した。しかし、越波を防御するために十分な天端高を確保することを想定すれば、起立時の高さ方向の扉体全長は傾斜角 60° の場合、傾斜角 75° の場合よりも1.1倍になる。起伏状態で連続扉体の幅方向を考慮すると、扉体を格納する函体基礎部も、より大きくなる。よって、本設備を設置するには透過特性を満足させると共に経済性も考慮して、傾斜角を決定することが重要である。

参考文献

- 1) Koshizuka, S. Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids.*, 1998, 26, 751-769.
- 2) 新里英幸, 藤田孝, 松岡幸文, 横山竜治: 非線形波と港湾構造物の連成解析, *Hitz技報*, 第68巻1号, pp. 26-29, 2007.
- 3) 森平倫生, 柿崎秀作, 合田良実: カーテン防波堤とその特性について, *港湾技術研究所報告*, 第3巻1号, pp. 1-27, 1964.
- 4) 森平倫生, 柿崎秀作: カーテン防波堤とその特性について, *第11回海岸工学講演会講演集*, pp. 222-227, 1964.
- 5) 中村孝幸, 神川裕美, 河野徹, 榎本一徳: 透過波と反射波の低減を可能にするカーテン防波堤の構造形式について, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp. 786-790, 1999.
- 6) 中村孝幸, 井手善彦: 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, *海洋開発論文集*, 第13巻, pp. 177-182, 1997.