

海域制御構造物の波、流れ、漂砂制御効果に関する実験的検討

建設省土木研究所海岸研究室 正会員 宇多高明
建設省土木研究所海岸研究室 正会員 村井禎美
同 上 正会員 山本幸次
部外研究員(パナ工業㈱) 正会員 武中信之

1. まえがき

土木研究所では、外洋に面した海域において、波、流れ、漂砂を制御することのできる海域制御構造物に関する研究を行っている。この結果、現在までに海域制御構造物の規則波に対する2次元的な消波効果を明らかにした¹⁾。しかし、構造物の消波効果の検討は、2次元的な検討のみでは不十分であり、平面的な消波効果の検討も必要である。また、漂砂制御効果についての検討も重要である。そこで本研究では、平面実験を行うことにより、海域制御構造物の平面的な消波効果、構造物周りの流れ、および漂砂制御効果を調べた。構造物のタイプは、消波機能の異なるスリット式、透過水平板付スリット式および複合消波式の3種類¹⁾とした。

2. 実験方法

実験は、幅16m、長さ20mの平面水槽を用いて行った。模型実験の縮尺は1/50とし、波浪条件は現地スケールで沖波波高 $H_0=2.5\text{m}$ 、周期 $T=9\text{s}$ の規則波とした。実験水槽と模型座標を図-1に示す。固定床および移動床ともに図-1に示す海浜模型とし、沿岸方向に一樣に製作した。水位は、造波板前面で水深40cmなるように設定した。固定床はモルタル、移動床は中央粒径 $d_{50}=0.28\text{mm}$ の砂で整形した。構造物模型

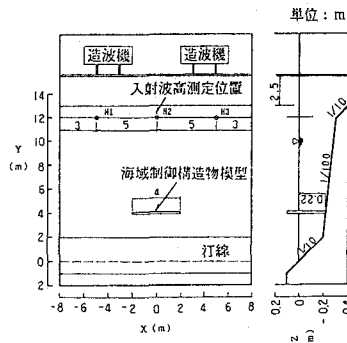


図-1 実験水槽と模型座標

の離岸距離は $Y_r=4\text{m}$ 、 8m の2種類で、この時の構造物設置位置での水深はそれぞれ22cm、26cmとなる。

入射波高は、沖側の水深30cmの位置に5m間隔で配置した3台の容量式波高計により測定した。波高分布は容量式波高計を用いて格子点(0.5m間隔)で測定した。また、フロートを用いて構造物周辺の流況を測定した。更に、構造物周辺及び構造物中心を通る岸沖方向断面の平均流速、流向の鉛直分布を2成分電磁流速計により測定した。

移動床実験では初期、1、2、4、6時間後に汀線位置を、初期、2、6時間後に海浜地形を測定した。また、実験開始6時間後には、固定床実験と同様に入射波高、波高分布、流況、流速の測定を行った。

固定床実験では3種類の模型の消波特性を調べた。また、離岸距離 Y_r の変化が波高や流れに及ぼす影響を知るため、スリット式模型を用いて離岸距離 Y_r を変えた実験も行った。移動床実験はスリット式と複合消波式の2種類の模型を用いて2ケース行った。各ケースの実験条件を表-1に、模型の諸元を表-2に示す。ただし、表中の K_T 、 K_R の値は同じ諸元の構造物を用いて2次元実験を行った結果である。

3台の波高計で得られた測定値から、各ケースの換算沖波波高を計算した(表-3)。データのばらつきが大きいので、3データより2データを選んで平均値を算出し、これより構造物設置位置での波高(入射波高; H_i)を求めた。

表-1 各ケースの条件

ケース	模 型	離岸距離 $Y_r(\text{m})$	設置水深 $h(\text{cm})$
①	スリット式	4	22
②	スリット式	8	26
③	水平板付スリット式	4	22
④	複合消波式	4	22
⑤	スリット式	4	22
⑥	複合消波式	4	22

表-2 構造物諸元

模型名称	概略図	諸元 透過率(K_t) 反射率(K_r)
スリット式 模型 ケース 1, 2, 5		$\epsilon_1=0.3$ $\epsilon_2=0.2$ $\epsilon_3=0.1$ $h_2/h=0.8$ $K_t=0.6$ $K_r=0.35$
透過 水平板付 スリット式 模型 ケース 3		$\epsilon_1=\epsilon_2=\epsilon_3=0.28$ $\epsilon_4=0.22$ $R/h=0.1$ $K_t=0.5$ $K_r=0.3$
複合消波式 模型 ケース 4, 6		$h_2/h=0.27$ $K_t=0.55$ $K_r=0.2$

透過率、反射率は2次元消波実験の結果

表-3 入射波高の測定結果

ケース No.	時 間 (hr)	換算沖波波高(cm)					周期 $T(\text{s})$	入射波高 $H_i(\text{cm})$
①	—	5.1	3.7	5.0	5.1	1.28	4.8	4.8
②	—	5.3	6.2	5.6	5.5	1.25	5.1	5.1
③	—	5.8	4.3	5.5	5.7	1.26	5.3	5.3
④	—	5.4	5.5	5.6	5.5	1.24	5.1	5.1
⑤	0	4.7	3.7	4.7	4.7	1.28	4.4	4.4
	2	4.8	5.2	5.9	5.0	1.25	4.7	4.7
	6	4.7	4.7	6.0	4.7	1.28	4.4	4.4
⑥	0	5.2	4.0	5.4	5.3	1.25	4.9	4.9
	2	4.6	4.0	4.9	4.8	1.26	4.5	4.5
	6	4.5	4.9	5.0	4.8	1.26	4.5	4.5

3. 固定床実験

3.1 スリット式

模型（ケース①：
 $Y_r=4m$ ）

最初に波高分布
を図-2に示す。
構造物により創成
される静穏域を入
射波高に対する波
高比が0.7以下の
部分とすると⁴⁾、

ケース①の入射波高は4.8cmであるから、静穏域は波高約3.4cm以下の範囲となる。この仮定によれば、静穏域は構造物とほぼ同じ幅で汀線付近まで形成されていることになる。

次に、波高の岸沖および沿岸方向分布を図-3に示す。岸沖の分布に注目すると、構造物による影響の少ない $X=4m$ 断面の場合、波高は汀線付近で浅水変形により急速に増大するほかは、約5cmの値で一定している。構造物を横切る $X=1.5m$ と $X=0m$ 断面では、 $Y=1.5\sim4m$ の範囲で $X=4m$ の場合より波高が約1.5cm減少している。一方、構造物の沖側では反射波により波高が増大している。特に $X=0m$ 断面では、反射波の影響が沖合まで及んでいる。沿岸方向の分布にも構造物による波高低減効果が顕著に表われており、 $Y=2.5m, 3.5m$ の両測線とも、構造物背後の $X=-2\sim2m$ の範囲で約2cm波高が低下している。

構造物周辺の流況を図-4に示す。構造物を通過した流れは $Y=2m$ 付近まで強い向岸流を形成する。汀線付近では水槽両側から中央部に向かう沿岸流が生じ、これらの流れは中央で会合し、離岸流となって、構造物と汀線の間で一對の循環流を形成する。この循環流の存在と構造物背後で波高が低いことの両効果により、構造物の岸側にはトンボロが形成されると思われる。また、構造物の沖側では、冲向きの流れが見られる。

電磁流速計により測定した平均流速の平面分布を図-5に示す。流速の鉛直方向変化を調べるために、底面上2cmと $(0.2\sim0.3)h$ での値を示す。ここで、 h は測定点の水深である。中央部で生じている強い離岸流は、図-4の流況と一致している。構造物に隣接する岸側部の上層では岸向き、下層では冲向き流れが生じ、これとは対照的に構造物の沖側の上層では冲向き、下層では岸向きと流れの向きが逆転している。このような流速、流向の鉛直方向の変化は、通常の海浜流モデルでは再現することができないが、構造物周辺での局所的な地形変動を考える場合には検討の必要がある。

3.2 スリット式模型（ケース②： $Y_r=8m$ ）

ケース②は

模型諸元をケース①と同一とし、離岸距離 Y_r のみを4mより8mと2倍にしたものである。最初に、波高の平面分布を図-6に示す。入射波高は5.1cmで、静穏域は波高が約3.5cm以下

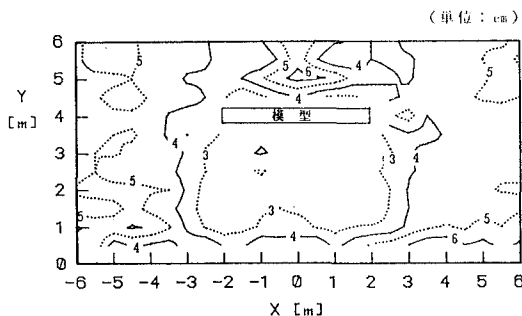


図-2 波高分布図（ケース①： $Y_r=4m$ ）

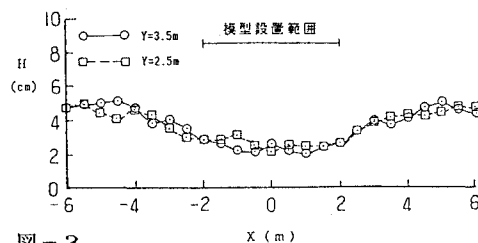
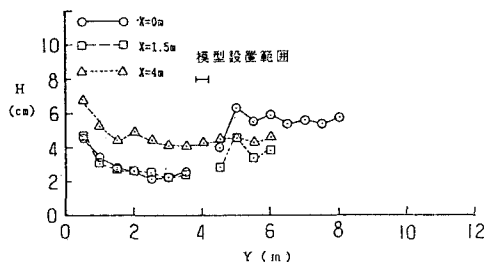


図-3 岸沖、沿岸方向の波高分布（ケース①： $Y_r=4m$ ）

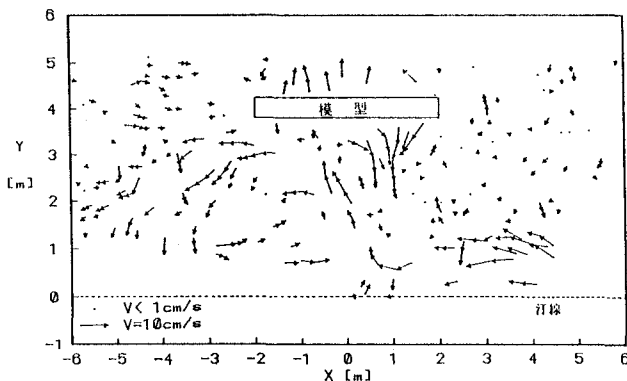


図-4 流況図（ケース①： $Y_r=4m$ ）

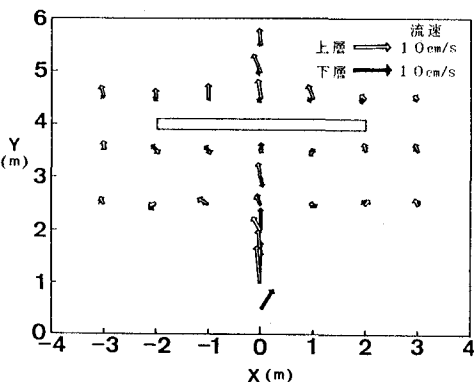


図-5 上、下層の平均流速の平面分布（ケース①： $Y_r=4m$ ）

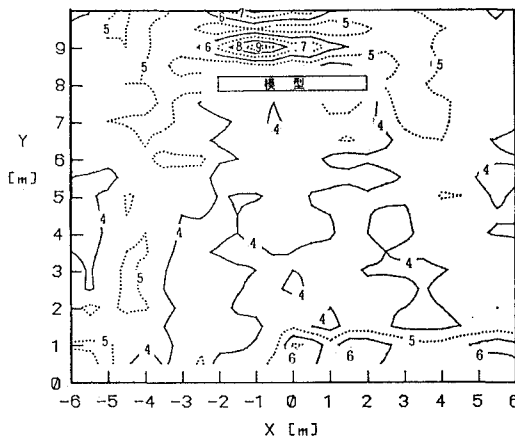


図-6 波高分布図（ケース②： $Y_r=8m$ ）

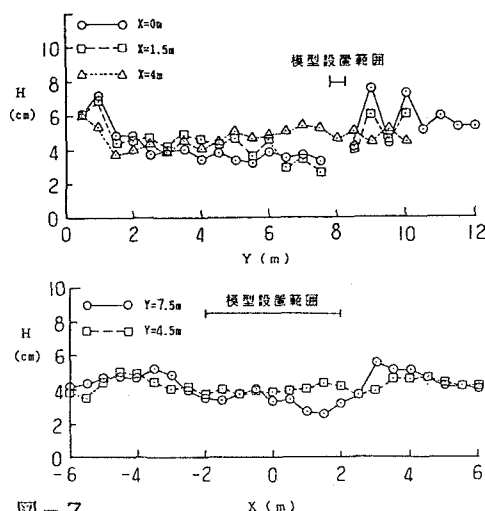


図-7 岸沖、沿岸方向の波高分布 (ケース②: $Y_r=8m$)

下の領域となる。離岸距離が大きくなったため、構造物背後の汀線付近では波高が高くなっている。そのため構造物設置による波高変化が少なくなり、汀線付近の波高は沿岸方向のどの点においても4~5cmの値を示す。構造物の沿岸方向の長さと比較して離岸距離を長くし過ぎると、静穏域の創出効果が汀線付近まで及ばないことが分かる。

代表測線における波高の岸沖および沿岸方向の分布を図-7に示す。構造物の岸側 $Y \leq 5m$ の範囲での波高はXによらずほぼ同じ値を持つ。構造物による波高減衰効果が見られるのは $Y=5m$ から構造物までの範囲に限定される。効果自体も離岸距離が $X=4m$ の場合(ケース①, 図-3参照)に比べ明瞭でない。沿岸方向の波高分布についてもケース①の場合に比べ、構造物背後の波高低下は明瞭でない。

流況は図-8に示すようにケース①に比べて顕著な特徴を持たない。構造物から $Y=6.5m$ 付近までの範囲では、岸向きの流れが形成されている。また、図の両端には岸向き流れが見られる。 $X=0m$ の汀線付近から斜め沖方向の離岸流が生じており、構造物手前まで達した後、両脇の岸向き流れに合流している。しかし、汀線付近での中央部へ向かう沿岸流は弱く、トンボロなどの地形変化は生じにくいと推定される。

3.3 水平板付スリット式模型 (ケース③: $Y_r=4m$)

波高分布を図-9に示す。入射波高は5.3cm、静穏域は波高約3.7cm以下の領域である。ケース①の場合と同様に、創出される静穏域は構造物とほぼ同じ幅を持ち、汀線付近まで延びている。

岸沖と沿岸方向の波高分布を図-10に示す。岸沖方向の分布はばらつきがあるものの、 $X=0, 1.5m$ 測線上の波高は $Y < 4m$ の範囲で $X=4m$ の値より1.5~2cm低くなっている。沿岸方向の波高もケース①の場合とよく似ており、構造物背後で波高低下が見られる。

流況を図-11に示す。中央部へ向かう沿岸流と中央部付近の離岸流が非常に強く、ケース①の場合と同様に一對の循環流が形成された。しかし、離岸流は $Y=3m$ 付近で左右に分流し、循環流の規模はケース①の場合に比べ小さい。構造物近傍では流速が速いため、フロート追跡ができなかった。これを考慮す

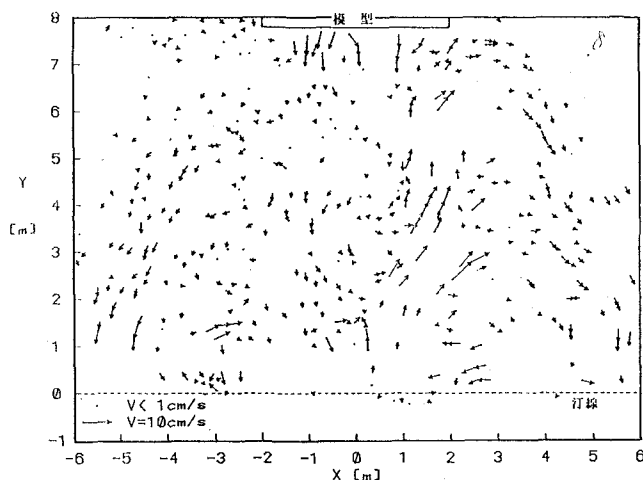


図-8 流況図 (ケース②: $Y_r=8m$)

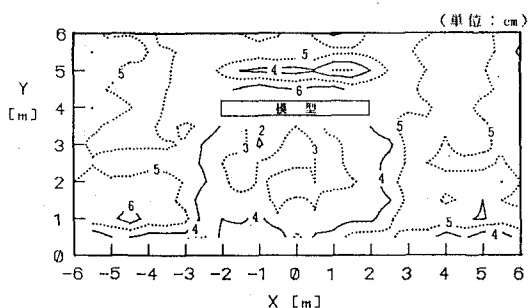


図-9 波高分布図 (ケース③: $Y_r=4m$)

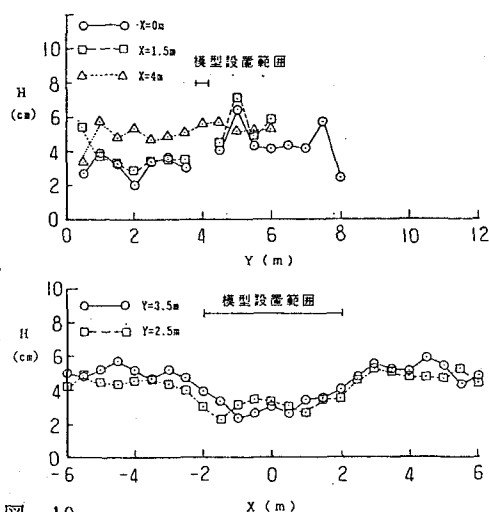


図-10 岸沖、沿岸方向の波高分布 (ケース③: $Y_r=4m$)

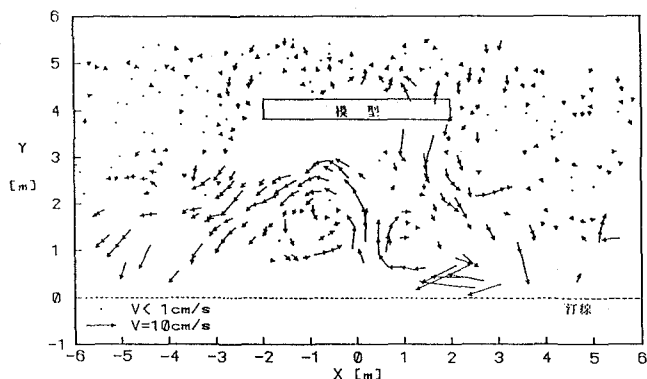


図-11 流況図 (ケース③: $Y_r=4m$)

ると、循環流の規模が小さい理由は、構造物より噴出する強い岸向き流れにより離岸流が抑制されたためと考えられる。構造物沖側での流れは弱く、流向にはっきりとした特性は見られない。

3.4 複合消波式模型（ケース④： $Y_r=4m$ ）

波高分布を図-12に示す。入射波高は5.1cmであるから静穏域は波高約3.6cm以下の海域である。静穏域はケース①の場合と同じく、構造物とほぼ同じ幅で汀線付近まで広がっている。構造物沖側での波高はケース①、③の場合よりも低く、

構造物からの反射波による波高の増大が小さい。

岸沖および沿岸方向の波高分布を図-13に示す。岸沖方向の波高分布によると、 $X=0m$ 断面では $X=4m$ 断面と比較し、構造物背後で約1.5~2cmの波高低減が見られる。また、 $X=1.5m$ の断面では $Y=2\sim4m$ の範囲では波高が低減しているが、 $Y=2m$ から汀線に近づくにつれて波高が増大し、汀線付近の波高は $X=4m$ の場合とほぼ一致する。

波高の平面分布に見られたように、構造物沖側での波高増大はほとんど見られず、構造物の反射波による影響は大きくないことが分かる。沿岸方向の波高分布には、構造物による波高変化が顕著に表われている。構造物背後の波高低下は2~3cmである。

流況を図-14に示す。沿岸流と、 $X=0m$ 付近の離岸流流速は非常に速い。これらの流れにより、静穏域では一対の循環流が形成されている。一方、構造物沖側での流れは弱く、顕著な流向も持っていない。

4. 移動床実験

固定床実験の結果から、構造物の種類を変えても離岸距離を一定とすれば波高及び流況に大きな変化は生じないことが分かった。特に、スリット式構造物と水平板付スリット構造物はほぼ同じ特性を示した。このことから、移動床実験では離岸距離を $Y_r=4m$ とし、構造物はスリット式構造物と複合消波式構造物とした。

4.1 スリット式模型（ケース⑤： $Y_r=4m$ ）

構造物形状と実験条件はケース①と同じである。8時間波を作用させた後の波高分布を図-15に示す。入射波高は4.4cm、静穏域は波高が約3.1cm以下の領域である。静穏域の大きさはケース①の場合とほぼ同じであるが、やや入り組んだ形状となった。これは海底地形の変動により浅海部での水深が変化したためである。静穏域形状は固定床実験の結果（図-2）と比較して大きな変化はない。

岸沖および沿岸方向の波高分布を図-16に示す。地形変動に伴う波高のばらつきはあるが、岸沖方向および沿岸方向どちらの場合もケース①で見られた特性と一致する。

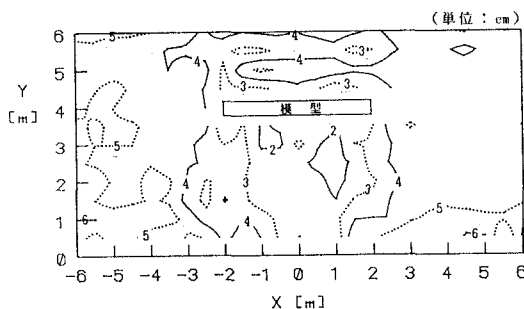


図-12 波高分布図（ケース④： $Y_r=4m$ ）

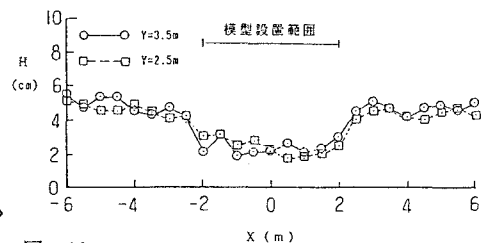
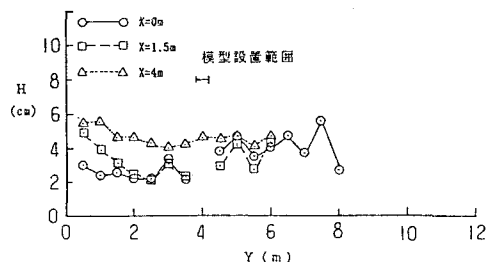


図-13 岸沖、沿岸方向の波高分布（ケース④： $Y_r=4m$ ）

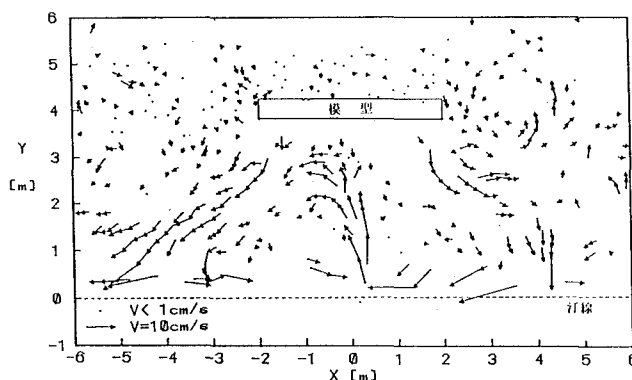


図-14 流況図（ケース④： $Y_r=4m$ ）

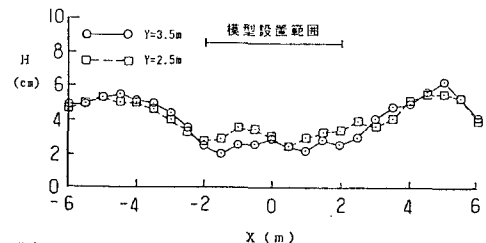
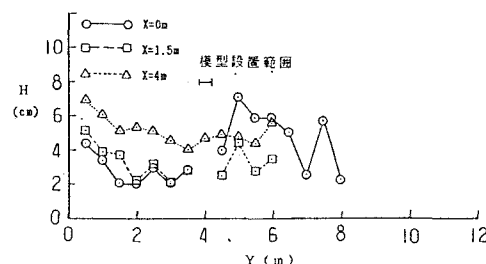


図-16 岸沖、沿岸方向の波高分布（ケース⑤： $Y_r=4m$ ）

図-15 波高分布図（ケース⑤： $Y_r=4m$ ）

実験開始6時間後の流況を図-17に示す。構造物の背後では弱い向岸流が存在する。汀線付近の沿岸流は固定床実験の場合(図-4)と比較して弱くなっており、地形変動が起きたことにより海浜安定後の流速は全体に弱くなった。

実験開始後1,2,4,6時間の汀線形を図-18に示す。1時間後の時点で、トンボロはすでに形成され、その後4,6時間で汀線形にほとんど変化がないことから、この形状で海浜は安定していることが分かる。トンボロは初期汀線から約25cm前進し、トンボロの形成とともに水槽両脇では汀線が約20cm後退した。

次に、沿岸方向各測線における海浜断面形の経時変化を図-19に示す。構造物中央を通る $X=0.0\text{m}$ 断面では初期汀線付近に砂が堆積し、汀線が前進している。 $Z=-7\text{m}$ 付近でわずかに侵食が生じているが、堆積土砂量の方がずっと多い。堆積の結果、汀線付近の海底勾配は急勾配になった。構造物の端を通る $X=2\text{m}$ 断面でも $X=0.0\text{m}$ 断面と同様に前浜上に砂が堆積している。しかし、その堆積量は $X=0.0\text{m}$ 断面に比べ少ない。これら断面での堆積量は同じ断面内の侵食量よりも多く、沿岸漂砂によって土砂が堆積したことが分かる。構造物設置位置から離れた $X=4\text{m}$ 断面では汀線付近が侵食され、汀線より岸側と水深10cm以深で土砂が堆積した。全体に侵食量に比べ堆積量は少なく、沿岸漂砂によって構造物背後へと砂が輸送されたことを示している。これらの地形変動が見られるのは海底勾配が1/10の部分であり、海底勾配1/100との変化点より沖側ではほとんど変化が見られない。このことからこの実験での移動限界水深は20cm付近であることがわかる。構造物の岸側ではほとんど地形変化がないが、沖側では反射波によると考えられる地形変動が見られる。

4.2 複合消波式構造物(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

構造物形状と実験条件はケース④と同じである。入射波高は4.5cm、静穏域は波高が約3.1cm以下の領域である。波高の平面分布を図-20に示す。静穏域の大きさ自体には大きな変化はないが、ケース④と比べ波高分布は複雑な形状となっている。

流況を図-21に示す。ケース④の場合に見られたような循環

流はなく、構造物より岸側に向かう強い流れが生じている。汀線付近の沿岸流は弱く、海浜変化を生じさせるような沿岸流はない。固定床で見られた流況(図-14参照)とは全く異なっている。

実験開始後1,2,4,6時間

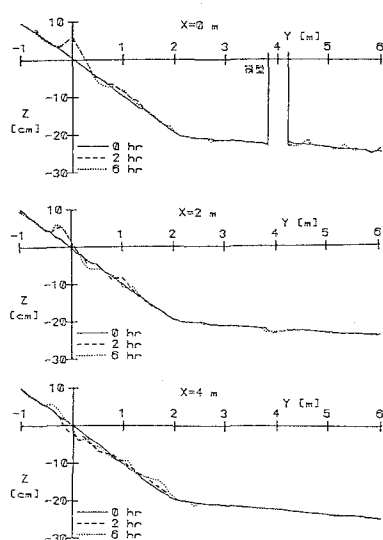


図-19 海浜断面変化図(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

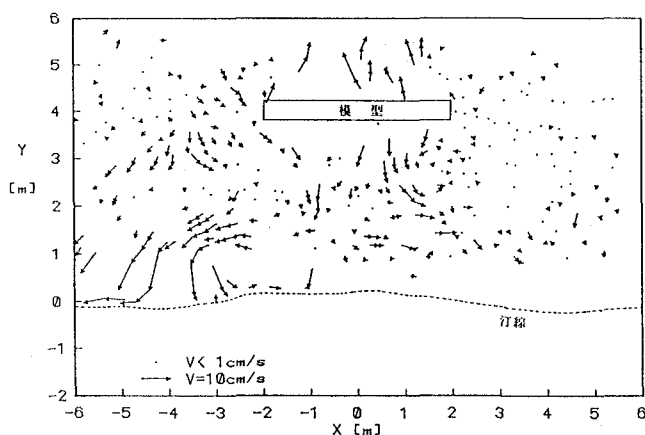


図-17 流況図(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

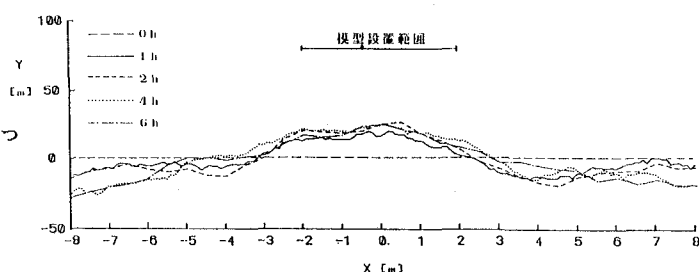


図-18 汀線変化図(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

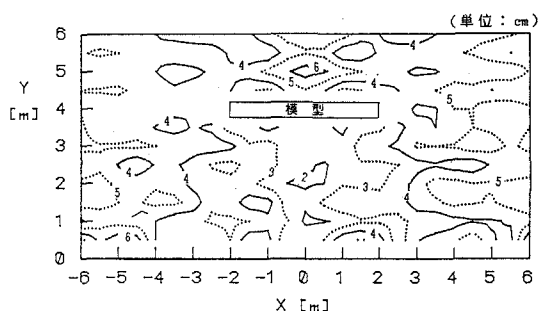


図-20 波高分布図(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

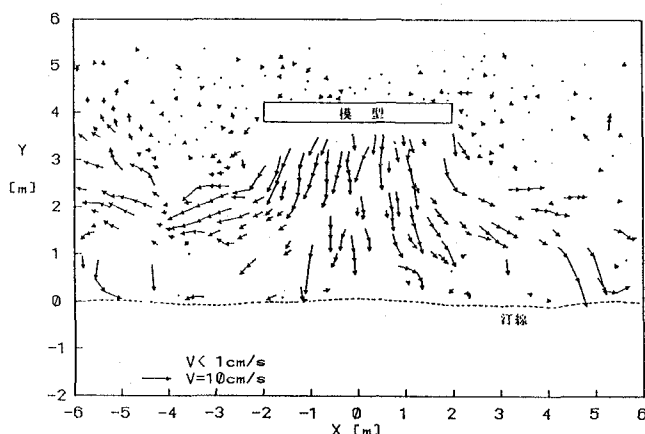


図-21 流況図(ケース⑤: $Y_r=4\text{m}$)

に観測された汀線の変化を図-22に示す。どの時間においても初期の汀線と大きな変化は無く、わずかに構造物設置位置で汀線に前進が見られ、水槽の左右両側で若干の汀線後退があるだけである。結局、ケース⑤のようなトンボロの形成は見られなかった。これは図-21に見られるように、このケースの場合の流況は構造物から岸側に向かう流れが卓越しており、トンボロの形成を進める沿岸流および離岸流が弱かったことが原因と考えられる。

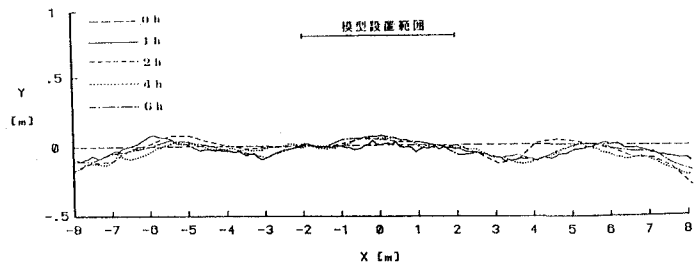


図-22 汀線変化図 (ケース⑥: $Yr=4m$)

沿岸方向各測線における海底断面の経時変化を図-23に示す。全断面とも砂が砕波帯より岸に打ち上げられた。汀線はあまり前進、後退していない。また、水深約10cmの場所で砂が堆積し、バー状の地形を形成している箇所も見られる。模型周辺では、ケース⑤に見られたような局所的な地形変化(図-19参照)は全く起こっていない。

ケース⑥ではケース④の結果から予想されたようなトンボロの形成は見られず、流況も全く異なったものとなった。汀線変化等の状況から見て、流況の変化が海浜変形後に生じたとは考えにくく、始めから流況が変化していたものと思われる。固定床と移動床という条件を除けば、ケース④、⑥で条件が異なるのは入射波高だけである。従来の研究からこの構造物では波高と喫水深により、透過率のばらつきが大きいことが分かっている⁴⁾。流況の変化はこれらの条件の違いによる可能性がある。ここでは、流況変化の原因をはっきりと特定することはできないが、この構造物が条件のわずかな違いにより、流況が大きく変化してしまう可能性は一つの問題点として指摘される。

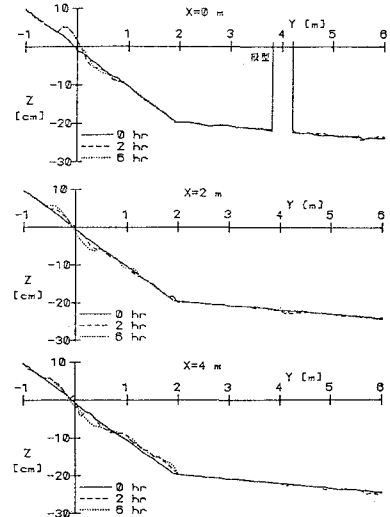


図-23 海浜断面変化図 (ケース⑥: $Yr=4m$)

5. 結論

- ①実験で与えた海浜断面形状では、構造物とほぼ同じ幅を持った静穏域が形成された。また、静穏域の形状は構造物の種類による変化がほとんど見られなかったが、離岸距離が長くなると、回折による影響で波高減衰の効果が汀線付近まで及ばなくなった。
- ②スリット式、水平板付スリット式、複合消波式の各構造物を離岸距離 $Yr=4m$ に設置した場合、汀線付近では左右両端より中心に向かう沿岸流が生じた。この流れは構造物の中心線上の汀線付近で会合し、離岸流を形成する。離岸流は構造物からの流れによって左右に別れ、最終的に一対の循環流を形成する。離岸距離を $Yr=8m$ と長くした場合には、このようなはっきりとした離岸流は見られなくなる。
- ③構造物周りで流速計を用いて測定した表面流速は、フロートによる流況の特性とほぼ一致する。ただし構造物周辺における流速の鉛直分布は上部と下部とで流向が逆転しており、構造物周辺の地形変化を考える場合には注意を要する。
- ④移動床実験で海底地形が変化した場合でも、スリット式構造物では波高および流況等の特性に変化は見られなかった。また、循環流により構造物の背後で汀線が前進し、トンボロが形成された。
- ⑤複合消波式構造物の移動床での波高分布は固定床の場合と大きな差異を持たなかったが、流況は全く異なり、広い範囲で岸向き流れが卓越した。また、構造物背後に顕著な循環流は形成されず、トンボロも成長しなかった。しかし汀線形に関しては、構造物設置前の状態がほぼ維持されている。流況の変化は波高と喫水深がわずかに変化したことの影響と推定される。この構造物ではわずかな条件の変化により、流況が全く異なる可能性もある。

参考文献

- 1)建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1),(2),(3),土木研究所資料, 第2454号,173p., 第2510号,138p., 第2511号,168p., 1987.
- 2)宇多高明・村井禎美・藤原隆一・松尾和男：海域制御 構造物による静穏域の創出効果,土木技術資料, vol. 29, No.8, pp.51~56, 1987.