

H型スリット板式海域制御構造物 (CALMOS)の水利特性

戸田建設(株) 土木技術開発室 正会員 佐藤敏文
新日本製鐵(株)土木事業開発部 正会員 高橋陽一
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 小俣 篤

1. まえがき

外洋に面した沿岸域において、海岸保全を図ると共に静穏な利用空間を創り出すには、波、流れ、漂砂を制御する海域制御構造物の開発が必要である。筆者らは、消波機能の異なる透過鉛直板と透過水平板とを組合わせて、効率的に消波を行うH型スリット構造物の開発を進めている。この構造物は、海面上より海底まで鉛直透過板を設けるのではなく、鉛直板の底部より海底までの間に水深の30%に相当する開口部を設けることに特徴がある(図-1)。これまでの研究^{1), 2)}によれば、この構造物の消波効果は、鉛直板および水平板の空隙率と鉛直板の吃水深に大きく依存することが明らかにされている。ここでは、透過板の空隙形状と寸法が消波特性と波力に及ぼす影響について2次元水理実験により検討する。また、重複波から碎波、碎波後の波までの実験波を用い、波力、波圧分布に及ぼす天端高の影響を調べることににより、本構造物への作用波力の算定法についても検討する。さらに、平面実験により本構造物の平面的な消波効果、流れおよび漂砂制御効果を調べる。

2. 消波・波力特性に関する2次元水理実験

2. 1 実験方法

空隙形状・寸法が消波、波力特性に及ぼす影響を調べる実験には、長さ142m、幅0.6m、水深1mの2次元造波水路を用いた(図-2)。水路には、1/50勾配の斜面と長さ10mの水平床を設け、この水平床上に縮尺1/25の模型を設置した。模型設置点の水深は0.4mであり、波高は模型前後に各々2台ずつ取付けた波高計により計測し、合田らによる入・反射波の分離推定法により入射、反射および透過波高を求めた。実験は規則波で行い、入射波高は3~16cm、周期は1.0~2.8秒の範囲で変え、全体で16ケースの波浪条件とした(表-1参照)。

構造条件を表-2に示す。実験では、空隙率と吃水比は各々0.2、0.7と一定に保ち、壁厚(b)、空隙寸法(D)、堤体幅(B)を種々変えた。単一板の場合、空隙形状は円孔と縦スリットとした。H型スリット板の空隙形状は円孔である。

碎波力実験では模型縮尺を1/25とし、長さ45m、幅0.6m、深さ1.2mの2次元造波水路に1/30勾配の斜面と水平床を設けた(図-3)。波浪条件を表-3に示す。実験では周期1.6~2.8秒、沖波波高9.7~23.7cmの規則波を作用させた。波浪条件は全体で16ケースである。碎波位置 X_b は模型の前面板より碎波点までの冲向き距離である。模型の構造を図-4に示す。模型は水路幅方向に3分割し、中央の波力測定部は水路床に剛結した2分力計2台に固定した。外側の波圧測定部は水路床に剛結し、24個の波圧計を取付けた。波力、波圧の測定時間間隔は2msecである。構造条件を表-4に示す。天端高は1.1h~-0.1hの間で変えた。ここに、hは水深である。

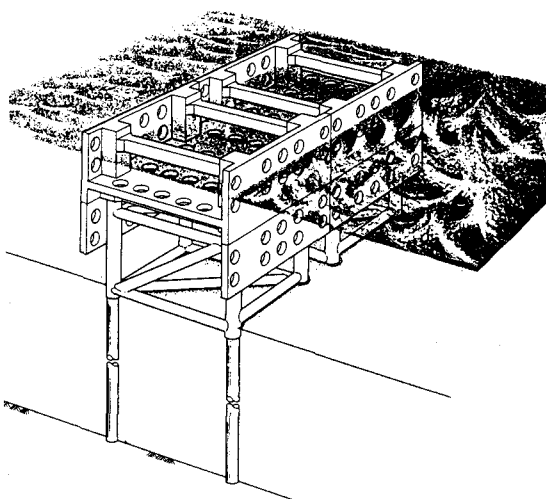


図-1 CALMOSの概念図

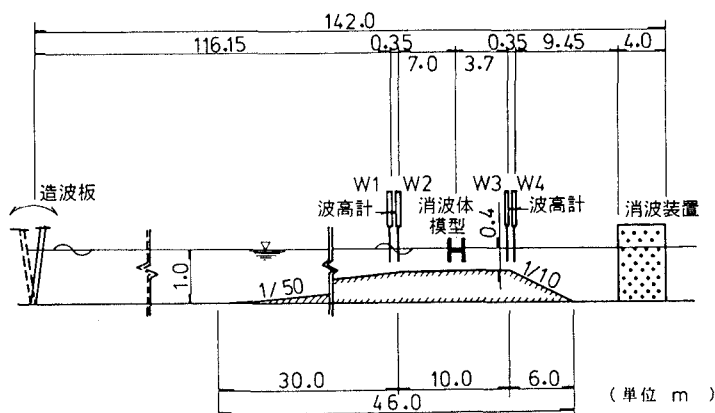


図-2 2次元消波・波力実験の装置

表-1 波浪条件

Wave No.	周期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (cm)	波高 H (cm)	波長 L (cm)	波形勾配 H/L
W1	1.0	3.7	3.5	146	0.024
W2	1.2	5.1	4.7	194	0.024
W3	1.2	7.7	7.0	194	0.036
W4	1.2	10.2	9.3	194	0.048
W5	1.4	6.2	5.7	239	0.024
W6	1.4	9.4	8.6	239	0.036
W7	1.4	12.5	11.5	239	0.048
W8	1.4	15.6	14.3	239	0.060
W9	1.6	7.3	6.8	283	0.024
W10	1.6	10.9	10.2	283	0.036
W11	1.6	14.6	13.6	283	0.048
W12	2.0	4.5	4.4	369	0.012
W13	2.0	9.1	8.9	369	0.024
W14	2.0	13.5	13.3	369	0.036
W15	2.8	5.8	6.4	535	0.012
W16	2.8	11.6	12.8	535	0.024

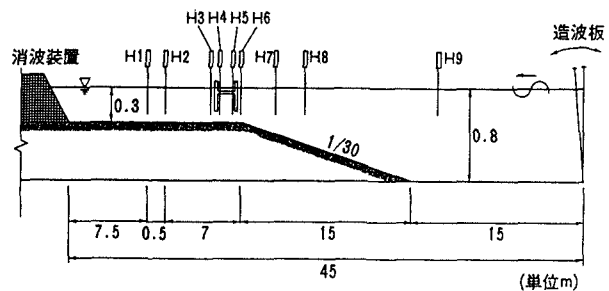


図-3 実験装置(砕波)

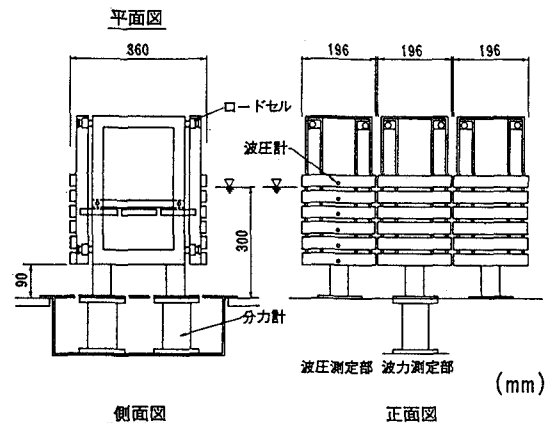


図-4 実験模型

表-2 構造条件

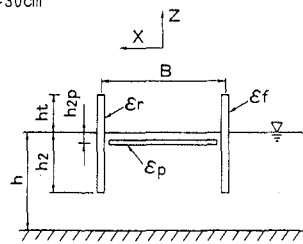
模型形状	空隙形状	D (cm)	b (cm)	b/D	備 考
単一板	円 孔	0.5	2.5	5.0	鉛直板空隙率=0.2、水平板空隙率=0.1 $h_1=20\text{cm}$ 、 $h_2/h=0.7$ $B/h=1.2$ 、 $h_{2P}/h=0.1$ 、 $h=40\text{cm}$
		1.0	2.5	2.5	
		3.0	2.5	0.83	
		3.0	5.0	1.67	
	縦スリット	0.4	2.5	6.25	
		1.2	2.5	2.08	
H型 スリット板	円 孔	2.0	2.5	1.25	
		1.0	2.5	2.5	
		3.0	2.5	0.83	

表-3 波浪条件(砕波)

Wave No.	周期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (cm)	砕波位置 X _b (cm)
W1	1.6	9.7	非砕波
W2	1.6	19.9	25
W3	1.6	20.7	50
W4	1.6	22.1	115
W5	1.6	23.7	186
W6	2.0	11.9	非砕波
W7	2.0	19.2	20
W8	2.0	20.3	102
W9	2.0	22.6	213
W10	2.4	12.2	非砕波
W11	2.4	19.1	18
W12	2.4	20.2	110
W13	2.4	23.2	265
W14	2.8	10.0	非砕波
W15	2.8	17.0	-7
W16	2.8	18.4	120

表-4 構造条件(砕波)

模型 No.	相 対 高 h_t/h	模 型 タイプ	備 考
1	1.1	非越波	鉛直板空隙率=0.2、水平板空隙率=0.1 $h_2/h=0.7$ 、 $h_{2P}/h=0.2$ 、 $B/h=1.2$ $h=30\text{cm}$
2	0.2	越波	
3	0.1	越波	
4	0.0	越波	
5	-0.1	越波	



2. 2 実験結果

(1) 空隙形状・寸法が消波・波力特性に及ぼす影響

同じ空隙率を持つ単一円孔板と縦スリット板の透過率 K_T 、反射率 K_R と、 b/D （板厚と空隙寸法の比）の関係を図-5に示す。 K_T 、 K_R は両タイプとも良く似た傾向を示す。 K_T は b/D が大きくなるにしたがって減少するが、その減少割合は縦スリットよりも円孔の方がやや大きい。一方、 K_R の b/D による変化はほとんど見られない。次に、これら2タイプの模型に作用する波圧の

水平波圧強度係数 f_x と b/D の関係を図-6に示す。ここに、 f_x は水平波力を入射波高と静水面下の透過板面積で除した値である。円孔モデルの f_x は b/D が大きくなると増加する傾向を示し、 K_T と b/D の関係と逆の傾向となる。すなわち、透過率の減少は波力の増大を伴っていると言える。一方、縦スリットの f_x は K_T の変化と同様ほとんど変化せず、 f_x は b/D にほぼ独立である。

次に、H型円孔スリット板構造物の K_T 、 K_R と相対幅 B/L の関係を図-7に示す。 K_T 、 K_R は B/L に応じて変化し、 K_T は0.65~0.05、 K_R は0.15~0.52の値をとる。それらの変化割合は2枚の透過鉛直板のみの場合¹⁾に比べて顕著である。これは、水平板の消波特性が B/L に大きく依存し、 B/L が大きくなると消波効果が著しく高くなるためと考えられる。また、 b/D を0.83から2.5に大きくすると K_T は約15%減少している。一方、 K_R は b/D の変化に対し明瞭な傾向を示さない。

円孔モデルの波力特性に関して、 f_x 、 f_z と B/L の関係を調べると図-8となる。 f_x は B/L が大きくなるにしたがい減少し、 K_T と B/L の関係と同様な傾向を示す。すなわち、単一板の場合と異なり、透過率と波力の減少が同時に生ずることが特徴と言える。この場合、 K_R に変化が見られなかったことから当然予想されるように、 f_z はほとんど変化しない。さらに、 b/D を0.83から2.5に大きくすると f_x は約15%、 f_z は約10%増加することも分かる。

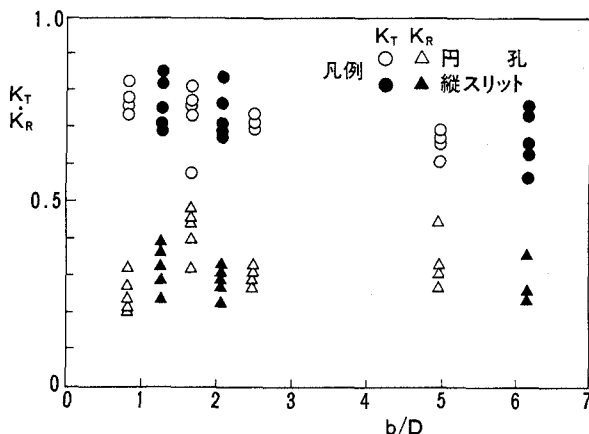


図-5 単一板の K_T 、 K_R と b/D の関係

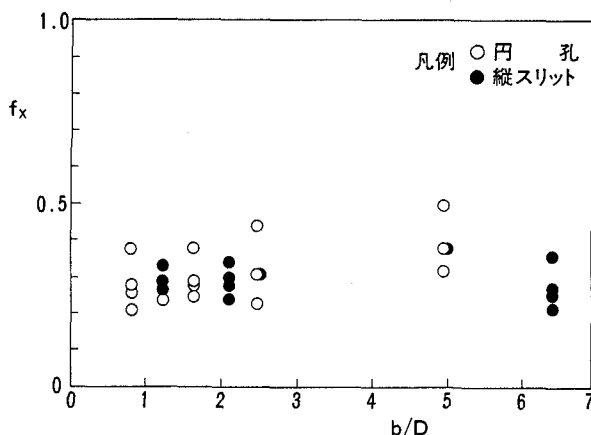


図-6 単一板の f_x と b/D の関係

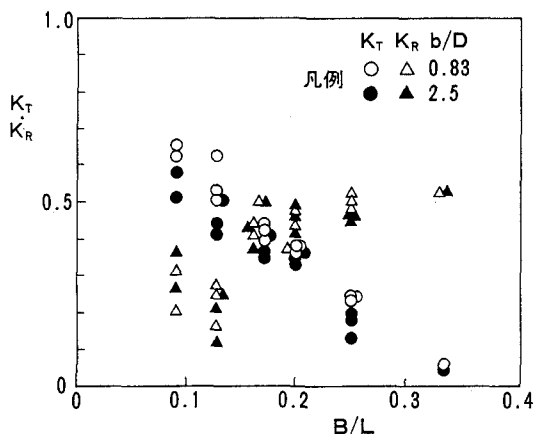


図-7 H型スリット板の K_T 、 K_R と B/L の関係

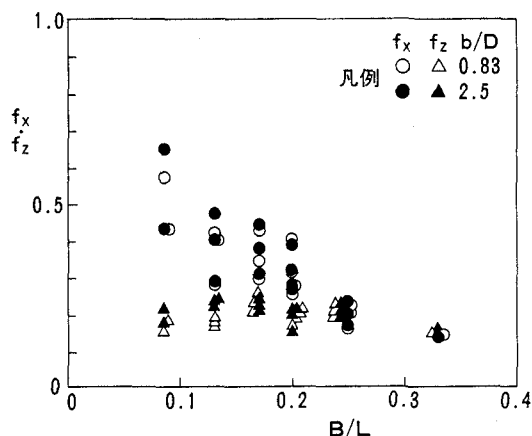


図-8 H型スリット板の f_x 、 f_z と B/L の関係

(2) 碎波力

周期1.6秒、沖波波高20.9cmの巻き波状碎波を越波状態で構造物に作用させたときの水平波力 F_x 、前面板の波力 F_{xf} 、背面板の波力 F_{xr} 、鉛直波力 F_z 、前面板沖側の波圧合力 ΣP の時刻歴波形を図-9に示す。ここに、水平方向は岸向きが正、鉛直方向は上向きが正である。 F_x は急激な立ち上りがなく、 F_{xf} と F_{xr} が最大を示す時刻の間、波力値が大きい。また、 F_x と F_z の最大値はほぼ同時に作用する。

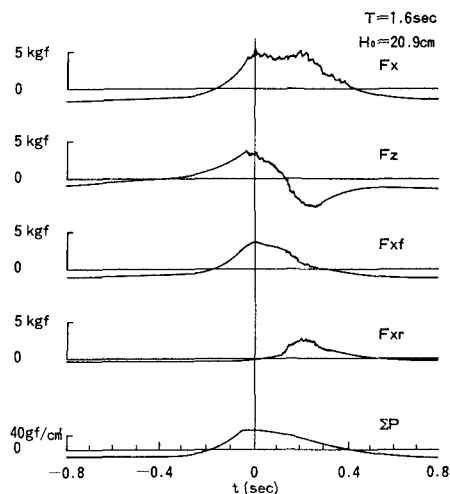


図-9 時刻歴波形 ($h_t/h=0.1$)

天端高と水深の比 h_t/h を -0.1 から 1.1 の範囲で変えた場合の平均水平波力 $\bar{F}_{x\max}$ と H'/h の関係を図-10に示す。ここに、砕波領域での H' は仮想通過波高を用い、 $\bar{F}_{x\max}$ は計測時間中の1波ごとの最大波力の平均値である。 $h_t/h=1.1$ は非越波模型、 $h_t/h=-0.1 \sim 0.2$ は越波模型である。非越波模型の $\bar{F}_{x\max}$ が $H'/h \approx 0.85$ で明瞭な最大値を示すのに対して、越波模型の $\bar{F}_{x\max}$ は H'/h が変化しても変化幅が小さく、波力も小さい。この場合、天端高が下がったため水表面近傍に大きくエネルギーが集中した砕波が構造物上を乗り越えたことにより衝撃的な波圧が作用しにくくなったと考えられる。

天端高 $0.1h$ の構造物へ最大水平波力が作用するときの波圧分布が図-11である。これより水平波圧は台形分布となり、鉛直波圧は水平板にほぼ一様に分布することが分かる。

以上の結果によれば、設計波力の算定法を次のようにまとめることができる。まず、水平波力は波力の低減係数を導入して合田式を準用する。水平波力の実験値 $\bar{F}_{x\max}$ と、合田波圧が前面板の実質部分に働くとして求めた水平波力 F_G の比、 $\bar{F}_{x\max}/F_G$ と H'/h の関係 (図-12) によれば、データの上限值として低減率は 0.85 となる。

次に、鉛直波圧は次式で与え、水平板実質部に一様に作用すると考える。

$$p_z = f_z \cdot W_s \cdot H_D \quad (1)$$

ここに、 f_z : 鉛直波圧強度係数、 W_s : 海水の単位体積重量、 H_D : 波高である。実験値より f_z は 0.26 となる。また、水平、鉛直波力の組合せは水平と鉛直の設計波力が同時に作用すると考える必要がある。

3. 波、流れ、漂砂制御効果に関する平面実験

3.1 実験方法

実験には、幅 $16m$ 、長さ $20m$ の平面水槽を用いた (図-13)。海浜模型は複合勾配とし、平坦部水深は $40cm$ とした。固定床実験ではモルタル海床とし、移動床実験では中央粒径 $d_{50}=0.28mm$ の砂で海床を整形した。模型の縮尺は $1/50$ とし、 $H_0=5.0cm$ 、 $T=1.27$ 秒の規則波を作用させた。

波高分布は容量式波高計を用いて $0.5m$ 間隔の格子点上で測定した。流況はフロートの動きを追跡して求めた。実験ケースを表-5に示す。固定床実験は単堤の場合 (ケース①) と、群堤として離岸距離を $6m$ に固定して開口幅を変化させた場合 (ケース②~④) からなる。移動床実験ではケース③と同一の諸元で波を6時間作用させた。これまでの消波実験の結果から実験条件における堤体の透過率、反射率を求めると 0.5 、 0.32 となる。海底地形および汀線形は実験開始前、造波を開始してから 1 、 2 、 4 、 6 時間後に測定した。また、造波後6時間には波高分布と流況を測定した。

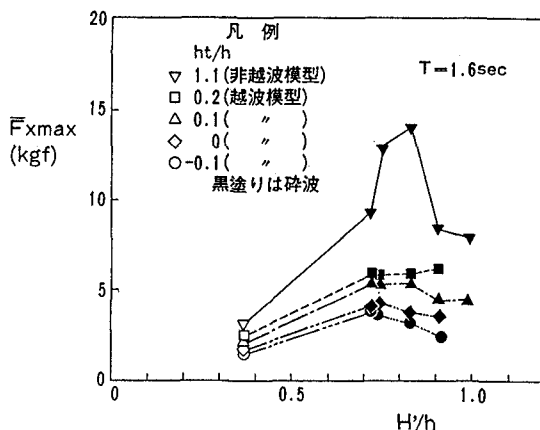


図-10 $\bar{F}_{x\max}$ と H'/h の関係

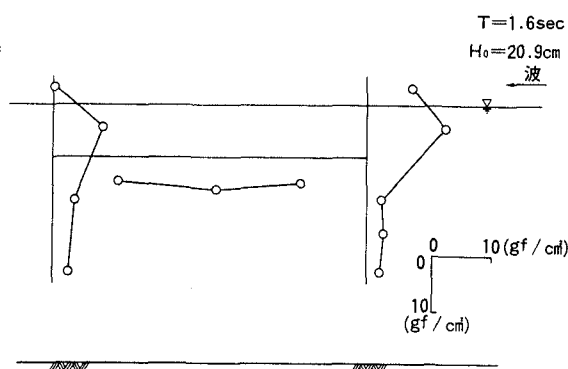


図-11 水平波力最大時の波圧分布 ($h_t/h=0.1h$)

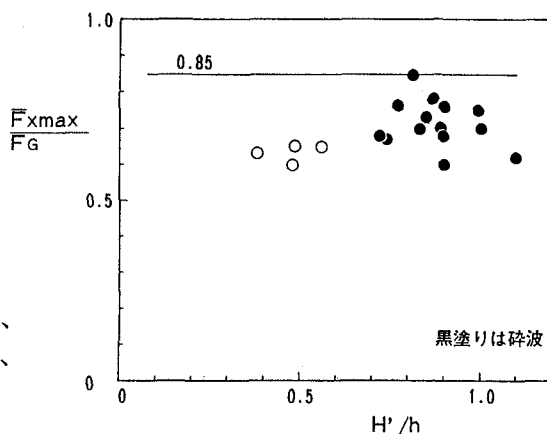


図-12 $\bar{F}_{x\max}/F_G$ と H'/h の関係 ($h_t/h=0.1h$)

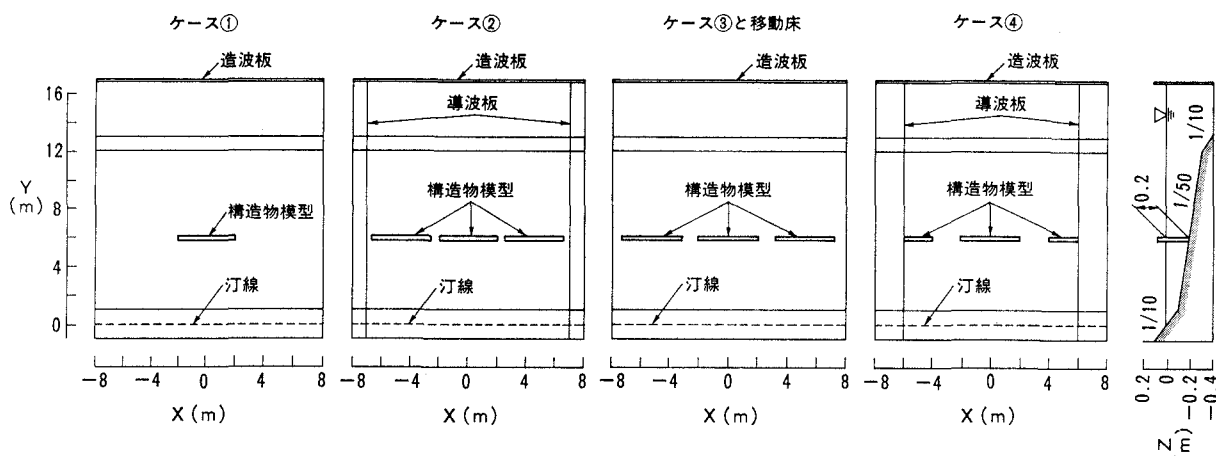


図-13 平面実験の装置

3. 2 実験結果

(1) 固定床実験

ケース①の波高分布を図-14に示す。堤体の設置範囲外の $X=-4\text{m}$ 断面では単に浅水変形により波高が増大するのみである。堤体の中央を通る断面($X=0\text{m}$)では堤体の設置により明らかに波高が低減している。堤体の沖側では堤体中央($X=0\text{m}$)ほど反射波により波高の増大が見られるのは当然である。沿岸方向の波高分布に関しては、 $Y=5.5\text{m}$ 断面で堤体による波高の低減効果が顕著である。 $Y=4.5\text{m}$ より岸側では回折波が進入し波高の低下が少なくなっている。このような波高分布に対応する流況が図-15である。汀線付近において堤体端部から中央に向かう沿岸流が中央で会合し、堤体と汀線の間で一對の循環流を形成する。また、堤体の沖側では沖向きの流れが見られる。

次に、開口幅を変化させた場合の波高分布を図-16に示す。開口幅を狭くすると波高は低下するが、その効果は堤体の中央断面($X=0\text{m}$)より端部を通る断面($X=-2.0\text{m}$)で顕著である。

(2) 構造物背後の汀線形の変化

造波開始後1、2、4、6時間の汀線形を図-17に示す。開口部背後は侵食され、堤体の中心で堆積し舌状砂州が形成された。汀線の最大前進量は13cm、最大後退量は14cmであった。造波を開始して1時間後の時点で舌状砂州が形成され、2時間以上波を作用させても汀線の変化は少なかった。

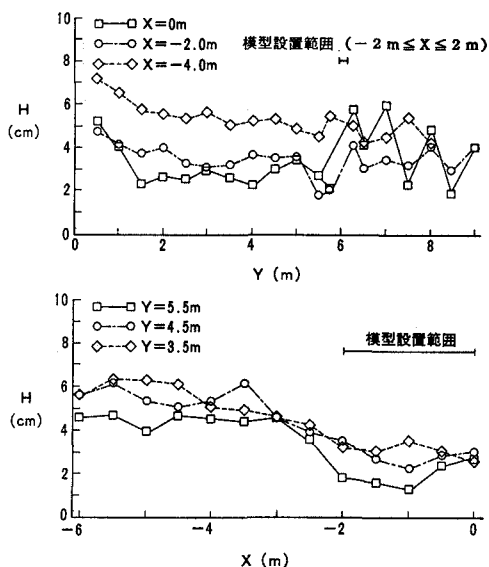


図-14 代表断面に沿う
波高分布形の比較(ケース①)

表-5 実験ケース(平面実験)

実験種別	ケース	離岸距離 $Y_r(\text{m})$	開口幅 $L(\text{m})$	設置水深 $h(\text{m})$	堤長 $\ell(\text{m})$	堤体の構造諸元
固定床	①	6	—	0.2	4.11	鉛直板空隙率=0.2 水平板空隙率=0.1 $h_2/h=0.7$ $h_{20}/h=0.2$ $B/L=0.15$ $h_1=0.1h$
	②	6	0.6	0.2	4.11	
	③	6	1.22	0.2	4.11	
	④	6	2.0	0.2	4.11	
移動床	6	1.22	0.2	4.11		

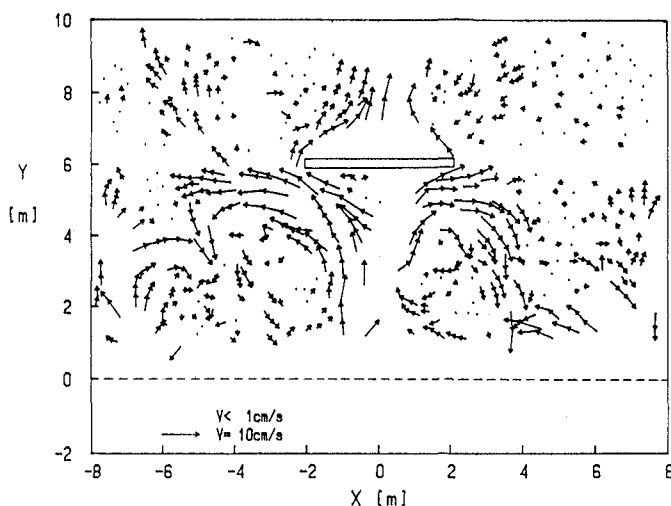


図-15 ケース①の流況

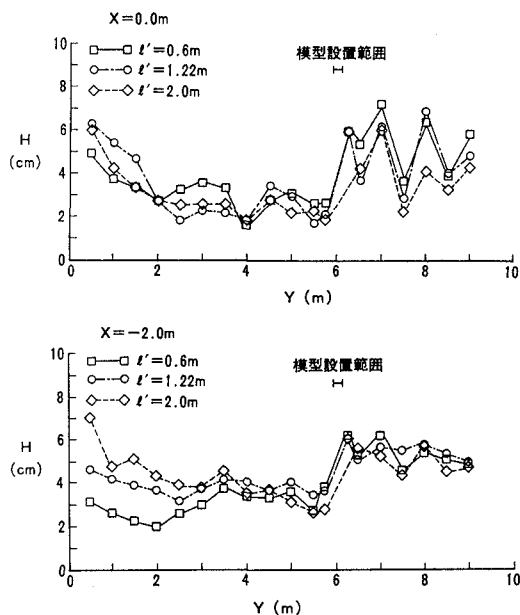


図-16 開口幅の変化が
波高分布に及ぼす影響

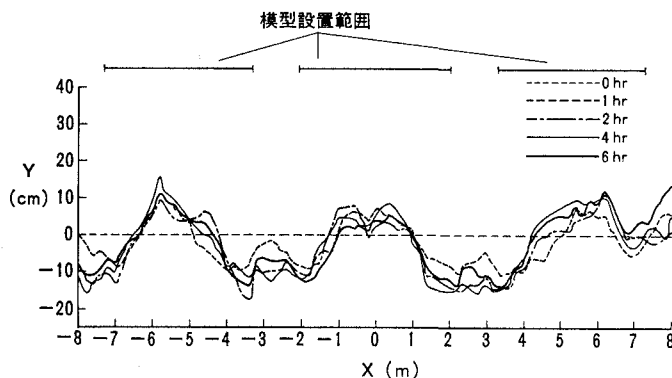


図-17 汀線変化

4. まとめ

- ①単一板スリット構造の場合、空隙寸法が小さくなると K_T は減少するが、その減少割合は円孔の方が縦スリットよりも大きかった。また、円孔の空隙寸法が小さくなると水平波力は大きくなったが、縦スリットの水平波力にはほとんど変化が見られなかった。
- ②非越波模型に比べて越波模型の波力は受圧面積の減少以上に小さくなった。この理由は、天端高が下がったために水表面近傍に大きくエネルギーが集中した碎波が構造物を乗り越えたことにより衝撃的な波圧が作用しにくくなったためである。また、構造物の設計において水平波力は合田波圧に低減率 λ を乗じた波圧が鉛直板の実質部に作用するとし、鉛直波力は波圧強度を $f_2 \cdot W_s \cdot H_0$ とすれば良いことが分かった。ただし、この場合水平波力と上向き鉛直波力を同時に作用させる必要がある。実験値により λ 、 f_2 を求めると、各々0.85、0.26であった。
- ③開口幅を狭くした場合、波高の低下は堤体の中央の断面($X=0\text{m}$)より堤体の端部の断面($X=-2\text{m}$)で顕著であった。
- ④移動床実験によれば、堤体背後には一対の循環流が形成され、これとともに背後の汀線が前進し、舌状砂州が形成された。

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)、土木研究所資料、No.2454、1987。
- 2)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(2)、土木研究所資料、No.2510、1988。