

津波防潮水門の定常流実験による圧力特性

富樫宏由*・林 栄港**・上田幸彦***・山口進吾***

1. 緒 言

河川遡上津波の遮へいを目的とした津波防潮水門は、諸用水を確保するために河川中流域や河口付近に設置される水門とはかなり異なった水理力を受ける。

特に水門がない場合の津波入射波高が、水門の上部に配置される幕壁の天端高に近似するようになると、遡上津波は水門・幕壁により反射重複し幕壁上部を大きく越流するため、幕壁の厚みが小さくしかも幕壁上面がフラットな場合には、その上面の圧力は著しく低下し水理・構造の両面において好ましくないことが津波波浪模型実験により明らかになった。^{1),2),3)}

そこで、著者らは上記の問題を解決する一つの方法として遡上津波が幕壁を越流するときの流況特性を考慮し定常流による二次元水理模型実験を行い、水門および断面形状をいろいろ変えた幕壁周辺の圧力特性を調べ同時に津波波浪模型実験の結果と比較してみた。

なおこの種の定常流による水理現象については、越流水深が比較的小さい場合、過去に幾つかの報告例⁴⁾がみられるが、本実験のように幕壁の厚みに比べ越流水深が非常に大きい場合について取扱った例はないようである。

2. 実験の装置および方法

実験に用いた水路は建設技術研究所川越試験所の幅1m、深さ1m、長さ27mの鉄筋コンクリート製回流式水路である(図-1)。

本水路は、290 l/secの流量が流せるようになっており、その上流端には、一様な流れを得るために整流格子が設けられ、その中央部には流れの状況が観察できるように側壁に観測窓が取り付けられている。

本実験で対象とした想定原型は三陸海岸に設置計画中の大型津波防潮水門で表-1に示すような断面形状である。実験に用いられた幕壁およびゲートは縮尺1/35、幅0.5mの二次元模型で透明なアクリル樹脂によってつくられた。

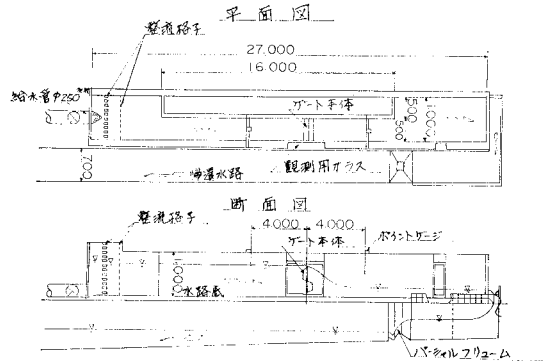


図-1 二次元水理模型実験施設概略図

このうち、幕壁は津波波浪模型実験で用いた厚み3m(実寸)のI型と厚み6mで上面形状のみ異なるII~V型の計5種類とした(表-1)。一方ゲートの断面形状は表-1中に示されている通りである。

表-1 実験に用いられた幕壁およびゲート形状

ゲート・幕壁の形状	幕壁の種類		深さ	
	D(m)	r(m)		
	I型	3	0	1
	II型	6	0	1
	III型	6	1	1
	IV型	6	1	10
	V型	6	1	5

幕壁およびゲートの模型は水路中央部の観測窓の位置に据付けられた。

実験は前述のように定常流状態で実施し、ゲートは河側または海側に配置され常に全閉状態とした。流れの状況は津波波浪模型実験で得られた津波越流時の流況と同様、完全越流状態として河側はせき上げしない。すなわち河側は射流状態とした。この場合、海側水深は津波入射波高の不確定性から種々変化させた。

幕壁およびゲートに作用する圧力は、これらの壁面に垂直に埋設したピエゾメータによりピックアップし、マノメータで計測した。

3. 実験結果と考察

(1) 幕壁およびゲートに作用する圧力

a) 幕壁上面の圧力

* 正会員 工修 長崎大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 建設技術研究所川越試験所長

*** 正会員

幕壁上面には流れの支配断面が存在するため、その上面の水深や流速は次々に急激に変化し流線の曲がり著しい。このため幕壁上面の圧力は遠心力の影響を受けて静水圧分布よりかなりかけはなれた分布になっている。その代表的な例を示したのが 図-2 である。図-3~9 は幕壁上面の圧力と海側水深の関係を表わしたものである。これらの図によると幕壁上面の圧力は幕壁の厚み D 、越流水深 h_0 、上面始端の円弧の有無および上面の勾配等によって相当に異なってくる事がわかる。

厚み 3m で矩形断面をした I 型幕壁では (図-3)、 $h_0/D \geq 2$ になるとその上面全域にわたって負圧が発生し、 $3.0 \leq h_0/D \leq 3.5$ の範囲で $-7 \sim -8$ m 水柱におよぶ最小圧力が生じる。 h_0/D がこの範囲を越えだすと河側がせき上げのない完全越流状態であるにもかかわらず幕壁上面の圧力は全域にわたってほぼ一様に急速に上昇することがわかる。これは幕壁上面の始端からはく離れた下側ナップが流速の増大によってその終端をとり越え、その上面圧力が自由落下水の分流エネルギーによる背圧の影響を受けるためではないかと考えられる。このような結果は従来報告された例がないようである。

いずれにしても上記のような大きな負圧が幕壁上面のほとんど全域にわたって発生することは水理的にもまた構造的にも好ましくない。

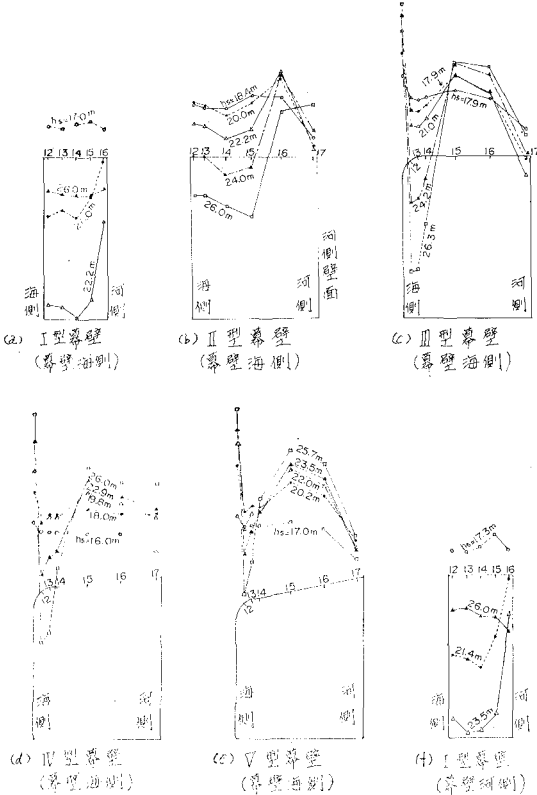


図-2 幕壁上面の圧力分布

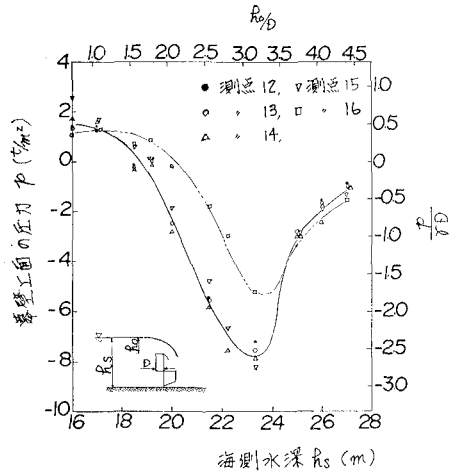


図-3 I型幕壁の上面圧力と海側水深の関係 (幕壁海側, ゲート河側)

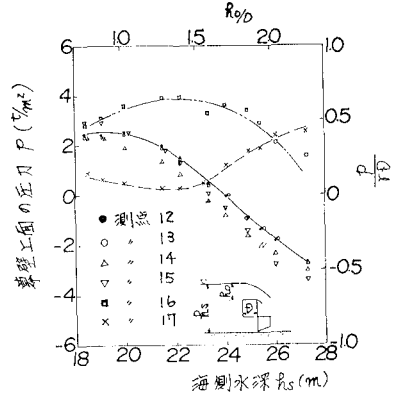


図-4 II型幕壁の上面圧力と海側水深の関係 (幕壁海側, ゲート河側)

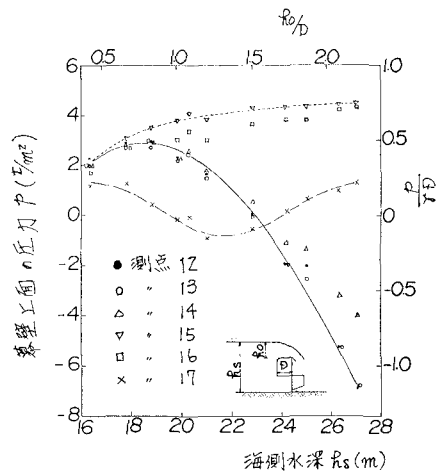
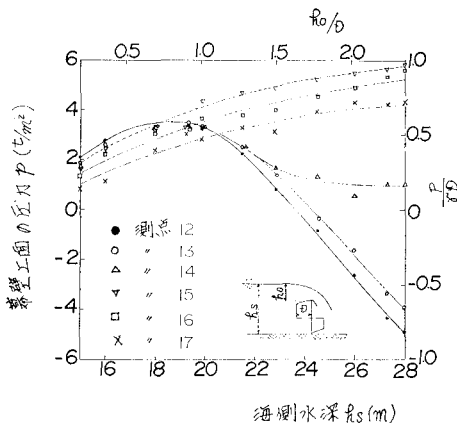
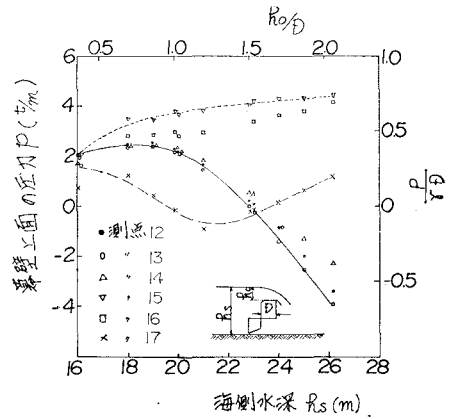


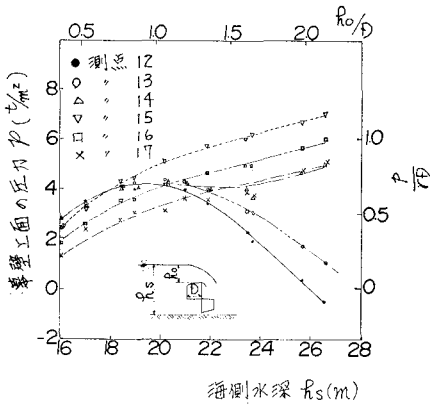
図-5 III型幕壁の上面圧力と海側水深の関係 (幕壁海側, ゲート河側)



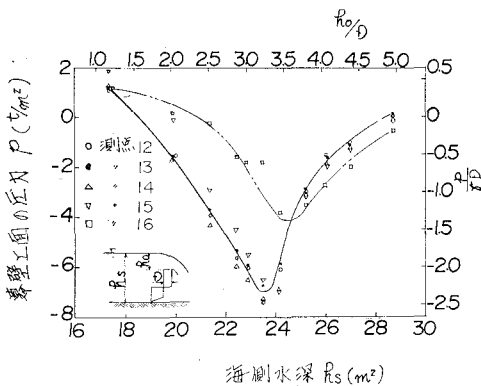
図—6 IV型幕壁の上面圧力と海側水深の関係
(幕壁海側, ゲート河側)



図—9 III型幕壁の上面圧力と海側水深の関係
(幕壁河側, ゲート海側)



図—7 V型幕壁の上面圧力と海側水深の関係
(幕壁海側, ゲート河側)



図—8 I型幕壁の上面圧力と海側水深の関係
(幕壁河側, ゲート海側)

矩形断面で厚みがI型の2倍になっているII型幕壁の場合には(図—4), 上面圧力はI型に比べ大幅に上昇し, 幕壁の厚みが上面の圧力上昇に大きく寄与していることがわかる。また上面に負圧が発生し始めるときは $h_0/D=1.6$ でI型の場合とほぼ一致する。このことは断面が矩形であれば幕壁が刃形堰とみなせる領域からその上面に負圧が発生し始めると考えられる。

II型幕壁の上面始端に丸味をつけた場合(III型幕壁)について調べてみると(図—5), その上面の負圧発生領域は終端に一部みられるが主に丸味をつけた部分に限られ, 上面中央付近での圧力は海側水深 h_s が増えるにつれて上昇することがわかる。

III型幕壁上面の直線部分を海側に向けて傾斜させると(IV型(図—6), V型幕壁(図—7)) 負圧発生領域はさらに狭くなり負圧そのものも小さくなる。

いずれにしてもII型~V型幕壁の上面圧力は, I型のように背圧の影響を受けないといえる。

次にゲートを海側に配置したときの幕壁上面の圧力について調べてみると(図—8, 図—9), ゲートを河側に配置した場合と類似の傾向を示していることがわかる。このことからゲートの配置関係が幕壁上面の圧力に与える影響は比較的少ないとみてよいだろう。

b) 幕壁下面の圧力

幕壁下面の圧力は明らかにゲートの配置関係に大きく左右される。ゲートを河側に配置した場合には, 幕壁下面領域に Stagnation point が存在するため幕壁下面の圧力は静水圧より大きくなるが, 高々2%増であることが確かめられたので, 本実験の範囲内ではほぼ静水圧とみなしても差支えないであろう。

一方ゲートを海側に配置した場合, 幕壁下面の圧力は落水水脈の巻返しにより, 越流水深が増えるにつれて水脈落下点の海側に形成される水クッションによる静水圧に近似するようである。このため幕壁下面の圧力はほと

んど水平な分布となり、その値は $h_s \geq 20\text{m}$ ならば、 $p_{OB} = (0.55 \sim 0.6) \gamma h_0$ (p_{OB} : 幕壁下面の圧力, γ : 水の比重量) で与えられ、ゲートを河側に配置した場合より大幅に低下する。

c) 幕壁上・下流面の圧力

幕壁下流面(海側壁面)の圧力はゲートの配置関係に多少影響を受け、ゲートを海側に配置した方がわずかではあるが小さくなる傾向があり、海側水深が増えるほどまた幕壁上面に近づくほど静水圧分布から離れてくる。

幕壁上流面(河側壁面)の圧力はゲートを河側に配置しても海側に配置してもほぼ直線的に変化し、幕壁上面に近い部分では負圧を生じていることが確かめられた。

d) ゲート上・下面および上・下流面の圧力

ゲート上面の圧力は明らかにゲートの配置関係によって大幅に相違し、ゲートを河側に配置した場合には海側水深が増えるほど大きくなり落下水脈がゲート上面をとび越えるような時は水クッションによりほとんど一様な分布となる。

しかしながら落下水脈がゲート上面に直接衝突するような時は、その衝突部の圧力は衝突水による動圧が加わるためかなり上昇し海側水面までの圧力水頭の約70%におよぶことがある。

一方ゲートを海側に配置した場合には、ゲート上面の圧力はほぼ静水圧に近似するため、ゲートを河側に配置した場合より大幅に大きくなる。

ゲート下面の圧力はゲートの配置関係にあまり影響を受けないようであるが、落下水脈の巻返しによってかなり高くなる。このためゲートを河側に配置した場合にはゲート下面の圧力が上面の圧力よりも相当大きくなる現象が起きている。

ゲート下流面(海側壁面)の圧力はゲートを河側に配置しても海側に配置しても静水圧で近似できる。

ゲート上流面(河側壁面)の圧力はゲートの配置関係に多少影響を受けるが、どちらの場合にもおおむね直線的な分布となるようである。

(2) 津波波浪模型実験との比較

津波波浪模型実験は前述のようにI型幕壁と相似した模型を用いて実施されたもので、津波入射波として周期20分、波高12.25m、波形 $\eta = a \sin^2(\sigma/2)t$, $\sigma = 2\pi/T$ なる孤立波状の1山の波が適用された。

津波波浪模型実験で得られた幕壁およびゲートの海側壁面に働く最大水平波圧は、ゲートを河側に配置すれば幕壁下流面(海側壁面)の位置における最大水深に対応した静水圧に近似し、ゲートを海側に配置すればゲート下流面(海側壁面)の位置における最大水深に対応した静水圧に近似しており、その最大水深はどちらの場合にも約24mであることが確かめられている。

図-10, 11は津波波浪模型実験で得られた最大波圧

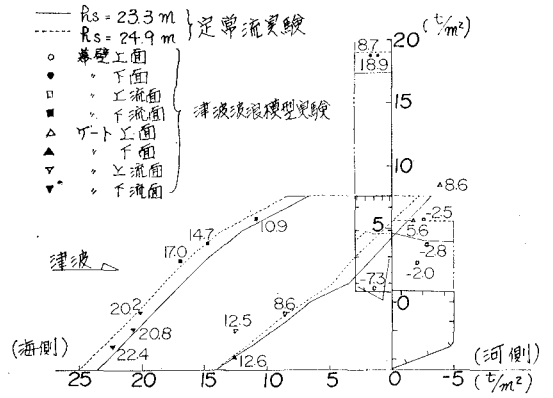


図-10 I型幕壁とゲートの圧力分布図 (幕壁海側, ゲート河側)

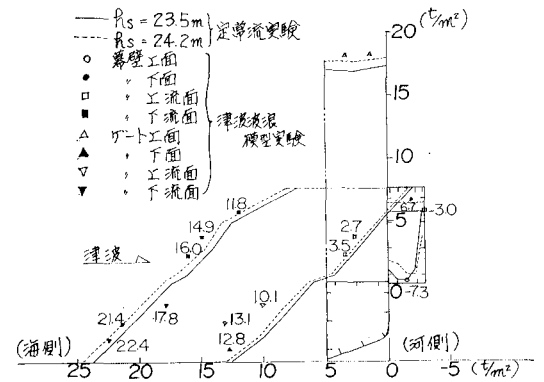


図-11 I型幕壁とゲートの圧力分布図 (幕壁河側, ゲート海側)

と本実験で得られた圧力分布を示したものである。

これらの図において水平方向圧力は幕壁下流面が基準面とされ、鉛直方向圧力は幕壁・ゲートいずれもそれぞれの上下面が基準面となっている。

これらの図から、幕壁・ゲートいずれも海側に面した部分および幕壁上面の波圧は、定常流実験による海側水深 $h_s \approx 24\text{m}$ での測定結果と近似することがわかる。

したがって、ゲートを河側に配置した場合には幕壁に働く揚力を本定常流実験により評価することができよう。

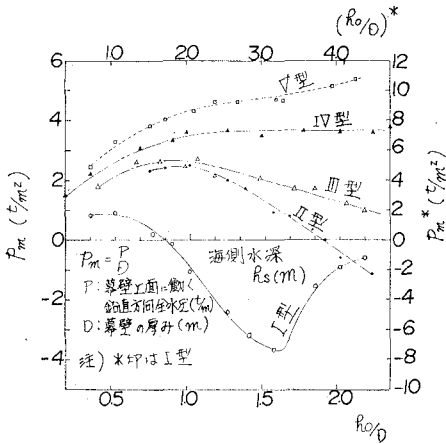
しかしながら、河側に面した部分はやはり津波越波時の非定常性から本実験値と津波波浪模型実験値はかなり相違するようである。

(3) 幕壁に働く平均鉛直方向水圧

a) 幕壁上面に働く平均水圧 $p_m(t/m^2)$

幕壁上面に作用する圧力を幕壁の全厚みにわたって積分し、これを幕壁厚み D で除したものを平均圧力 p_m とする。この p_m と海側水深 h_s の関係をゲートが河側に配置された場合について示したのが図-12である。

これによると、I型幕壁の場合 p_m は h_s が17mの



図—12 幕壁上面に働く平均圧力 p_m
(幕壁海側, ゲート河側)

近傍で最大となり、 h_s が 19m を越える付近から負になる。 p_m の最小値は h_s が 23~24m の範囲で生じ、その値は約 -7.4 t/m^2 におよんでいる。

II型幕壁では、 p_m はI型に比べ大幅に増大し、幕壁の厚みの効果が顕著であることを示している。また p_m が最大となる h_s は約 20m でI型幕壁と異なるが、 h_0/D はほぼ一致することがわかる。

III型幕壁の p_m はII型幕壁と同様 h_s が 20m 付近で最大となり、II型より常に大きいが $h_0/D < 1$ 、ならばその差はわずかであって幕壁上面の始端に設けた丸味の効果は h_s が増えるほど大きくなるといえる。

IV型幕壁の p_m はIII型よりさらに大きく、 h_s が 20m 付近までは h_s とともに増加するが、 $h_s > 20\text{m}$ になると p_m はほぼ一定となる。このためIV型幕壁とIII型幕壁の p_m の差は h_s が増えるほど大きくなる。このことは、 h_s が増えるほど幕壁上面の勾配が p_m を増大させる効果が大きいということである。V型幕壁の p_m は他の形状に比べ最も大きく h_s とともに常に増大することがわかる。

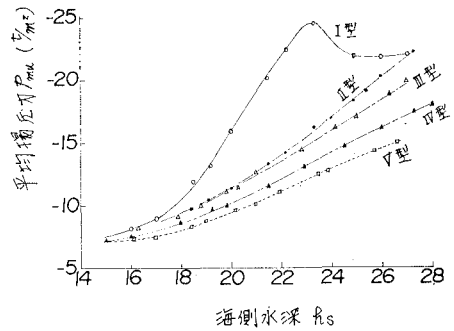
なお、 p_m はゲートを海側に配置しても河側に配置した場合と類似の傾向を示すことが確かめられている。

b) 幕壁に働く平均揚圧力 $p_{mu}(\text{t/m}^2)$

幕壁下面に作用する水圧は、3. (1) b) で述べたようにゲートを河側に配置した場合ほとんど静水圧とみなせるので、一様な分布となるわけである。

そこで、この下面圧力と幕壁上面に作用する平均圧力 p_m の差を平均揚圧力 p_{mu} とし、これが海側水深 h_s とどのような関係にあるかを表わしたのが図—13である。

図からわかるように、 p_{mu} は当然負となるので幕壁は上向きの圧力を受けるわけであるが、II~V型幕壁の p_{mu} はI型に比べ著しく低下し幕壁の厚み、越流始点の丸味および上面の勾配が平均揚圧力の減少に大きく寄与しているといえる。特に $18.5 \leq h_s \leq 24.5\text{m}$ の範囲で

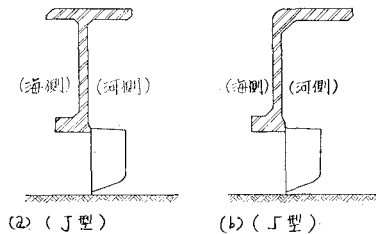


図—13 幕壁に働く平均揚圧力 p_{mu}
(幕壁海側, ゲート河側)

は幕壁の厚みが p_{mu} を減少させるのに最も有効であると考えられる。

現在岩手県の三陸海岸に設置計画中である大型津波防潮水門の上部に配置される幕壁は、その上面形状として半径 $D/6$ の円弧と海側に向かって $1/20$ 傾斜した直線の組み合わせ (III型とIV型の中間の形状) を採用すれば、揚力が幕壁自重よりも小さくなることが明らかになった。

なお、図—13 に示す平均揚圧力 p_{mu} は前述のように幕壁上下面の圧力差から求められたものであるから、幕壁がシェル構造で水が充滿していればこの p_{mu} は大幅に減少することになる。しかしながら、津波越波時幕壁下面における圧力上昇速度は相当に速く、幕壁内への流入水重による揚力低下はあまり期待できないと考えられるので、構造強度上許し得るならば幕壁断面を図—14に示すような上部のみ厚くしたJ型あるいはL型形状にすることが、揚力減殺対策上より効果的な方法ではないかと考えられる。



図—14 J型およびL型幕壁

(4) 幕壁上面の圧力係数 α

幕壁上面の圧力は前述のように静水圧分布よりかなりかけはなれた分布になっているので、幕壁上面の水圧荷重をある無次元量を用いて簡単に算定できるようにしておく設計上便利である。

このような観点から無次元量 α と h_0/D の関係をゲートが河側に配置された場合について示したのが図—15である。この α は圧力係数とよび、 $\alpha = p_m / \gamma h_0$ で表わされる。図—15 から、II, III, IV およびV型幕壁では α は越流水深 h_0 が増えるほど低下していくが、I型幕

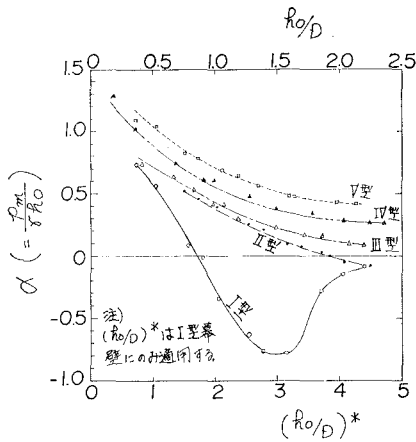


図-15 幕壁上面の圧力係数 α
(幕壁海側, ゲート河側)

壁では α と p_m (図-12) の関係が比較的類似していることがわかる。

また, IV型とV型幕壁の α は h_0/D が小さくなると1より大きくなっているが, これは h_0 を幕壁天端からの越流水深としていることによる。

なお, I, II およびIII型幕壁では平均圧力 p_m にピーク値が存在するので, 越流水深が最大(設計値)のところでも必ずしも幕壁上面の全圧力は最大になるとは限らない。したがって, 幕壁上面の全圧力にのみ着目した場合, I, II およびIII型幕壁の α の決定には留意する必要がある。

4. 結 言

本実験の結果より, 次のような結論が得られる。

(1) 津波波浪模型実験(非定常流実験)で用いられた模型と相似しているI型幕壁の上面圧力は, 定常流実験によると, $3.0 \leq h_0/D \leq 3.5$ の範囲で最小となり, その

最小値(-7~-8m水柱)は非定常流実験で得られた結果と近似している。

(2) h_0/D が上記の範囲を越えだすと, せき上げのない完全越流状態であるにもかかわらず幕壁上面の圧力は急速に上昇する。

(3) 幕壁の厚みをI型の2倍にすると, その上面の圧力は大幅に上昇し, 越流始端に丸味をつけたり上面を海側に向けて傾斜させるとさらに上面の圧力上昇をきたす。その結果, 幕壁に作用する平均揚圧力が減少し, ゲートを河側に配置しても幕壁に働く揚力を幕壁自重より小さくすることができる。

(4) 幕壁の形状によっては, 越流水深が最大(設計値)のところでも必ずしも幕壁上面の全圧力は最大になるとは限らないので, 圧力係数 α の決定には十分留意する必要がある。

(5) ゲートの断面が本実験に用いたような形状であると, 越流落下水の巻返しによりゲート下面の圧力は著しく上昇する。このためゲートを河側に配置した場合, 津波越波時のゲートに作用する鉛直方向力については設計上十分留意する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 富樫宏由・藤田紀夫・山口進吾: 津波防潮水門の遮蔽効果に関する実験, 第28回年次学術講演会講演概要集, 第2部, 1973. 10, pp. 77~78
- 2) 富樫宏由・山口進吾・平山康志: 津波防潮水門の効果と設計波圧について, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973. 11, pp. 151~155
- 3) 富樫宏由・山口進吾・上田幸彦: 津波防潮水門の効果と波圧に対する構造形式の影響, 西部支部昭和49年度研究発表会講演集, 1975. 2, pp. 121~124
- 4) 吉川秀夫・岩田和男・土屋昭彦: 幅厚せきの流量係数に関する一考察, 土木研究所報告, 第103号, 昭和35年(1960)