

スリット式構造物に作用する波力の特性

宇多 高明*・村井 禎美**・館 克彦***

1. ま え が き

筆者らは、外洋に面した海岸において波、流れ、漂砂を制御することのできる海域制御構造物の研究開発を進めている。その形式の1つとしてスリット式構造物がある。この構造物については、既に消波効果の検討を実施したが、波力の検討は不十分であった。波力に関する従来の研究では、不透過構造物に作用する波力に検討の重点があった。また、スリット式構造物などの透過性構造物に対する波力の研究としては、堀口ら(1977)や萩原ら(1988)がポテンシャル理論による方法で、また近藤ら(1979)はモリソン式を準用する方法で波力算定式を提案した。これらの算定式は、複雑な関数を使用し、また限られた構造条件のみを対象としているため、実用上便利ではない。そこで本研究では、スリット式構造物の構造特性、碎波形式と波力の関係について実験的に調べ、これに基づいて波力の実用的算定法を示した。

2. 実験方法

実験は造波水路($L=52\text{m}$, $B=0.6\text{m}$, $h=1.2\text{m}$)を用いて行った(図-1)。仮設水路床は、巻波碎波が発生するよう造波板より25m離れた位置から5m間を1/10の一樣勾配とし、それより水路端までの15mを水平床とした。構造物模型は水平床端部に設置した。模型縮尺は1/25、水深は0.3mとした。波高は7台の容量式波高計により測定した。波高計1,2で計測した水位変動から入射、反射波高を、波高計6,7で透過波高を算出し、これらより反射率、透過率を計算した。また波高計3により碎波波高を、波高計4,5により模型直前(沖側)、直後(岸側)の波高を測定した。波力計測に関しては、三分力計により測定部全体に作用する水平波力(F_x)と鉛直波力(F_z)を測定した。また、波圧計や部材に取り付けたひずみゲージによって部材波力を測定した。

波力実験では、空隙率(0~0.4)、天端高(14, 27cm)、

スリット(1~3枚)を変化させて実験した。模型は木製であり、その高さは44cm、部材厚は4cm、スリットの上下間隔は4cmである。なお、2, 3枚スリット模型のスリット板間隔は各々41cm, 20.5cmとした。

波浪は、重複波と碎波を作用させた。重複波作用時の入射波高は、10, 20cmの2ケースとした。また碎波が作用する場合の入射波高は、模型位置で碎波が作用する条件、各周期において最大波力の作用する条件、および碎波後の波が作用する条件とした。

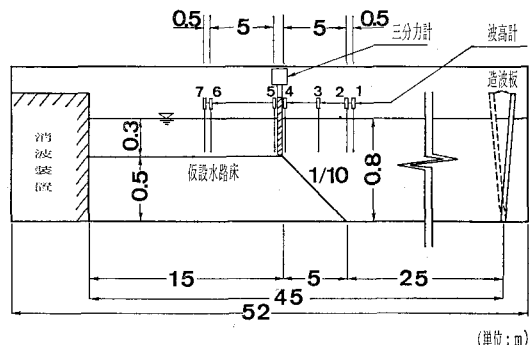


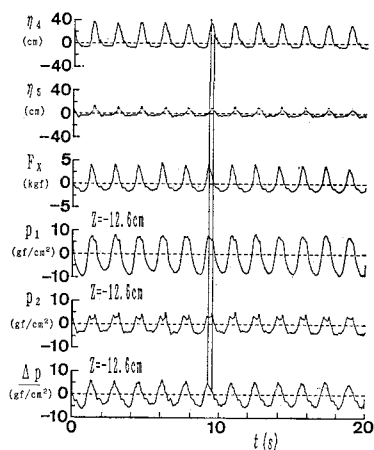
図-1 実験装置

3. 不透過壁と透過壁に作用する波力特性の差違

重複波の作用下における透過壁($\varepsilon=0.3$)のスリット前、背面の水位(η_4 , η_5)、水平波力(F_x)、静水面下12.6cmのスリット前、背面の波圧(p_1 , p_2)及びそれらの差圧(Δp)の時刻歴を図-2に示す。ここに、波浪条件としては仮想通過波高 $H'=20\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$ である。 F_x と p_1 は η_4 が最高となる瞬間に最大となる。 p_2 も η_4 が最大となる瞬間にピークを持つが、更に引波時に次のピークを持つ双峰型の波形を示す。また Δp は η_4 が最高となる瞬間に最大となる。

一方、重複波($H'=20\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$)を不透過壁に作用させた場合、水平波力と前面水位は双峰型波形を示した。合田ら(1966)によれば、双峰型波形は水底付近で測定された波圧に最初に現われ、波形勾配が大きくなる

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 建設省河川局海岸課技術第一係長
 *** 正会員 (元)建設省土木研究所海岸研究室部外研究員(大成建設(株))



図—2 η_4 , η_5 , F_x , p_1 , p_2 , Δp の時刻歴
($\varepsilon=0.3$, $H'=20$ cm, $T=1.6$ s)

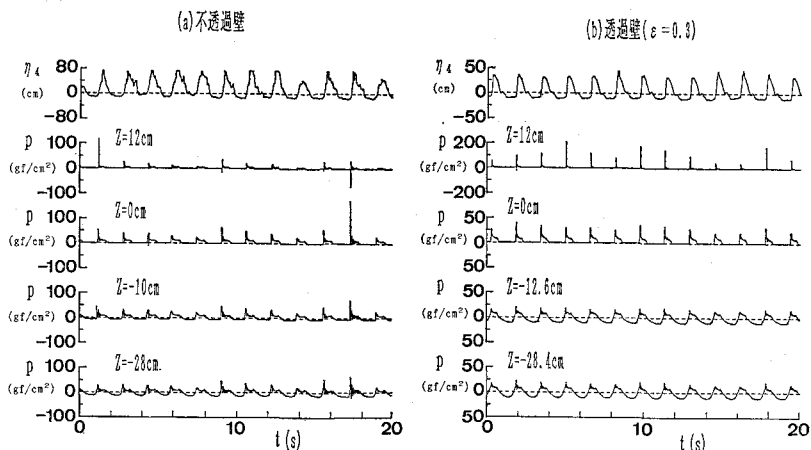
にしたがい静水面以上の波圧波形にも現われるようになる。双峰型波形は入射波周期の1/2周期を持った波圧成分が強まるため発生する。これに対し、透過壁前面に作用する波圧では、双峰型の2つ目のピークが小さくなり、単峰型波形を示したことが明らかである(図—2参照)。

透過性構造物では抗力が卓越するので、波の峰の位相において水粒子速度が最大となる時波力が最大となる。一方、不透過壁での波圧波形に双峰型が発生する原因は反射波に起因することが明らかである。なぜなら不透過構造物の前面波圧に生じていた双峰波形が、構造物の透過性を増すにつれて単峰型となったからである。

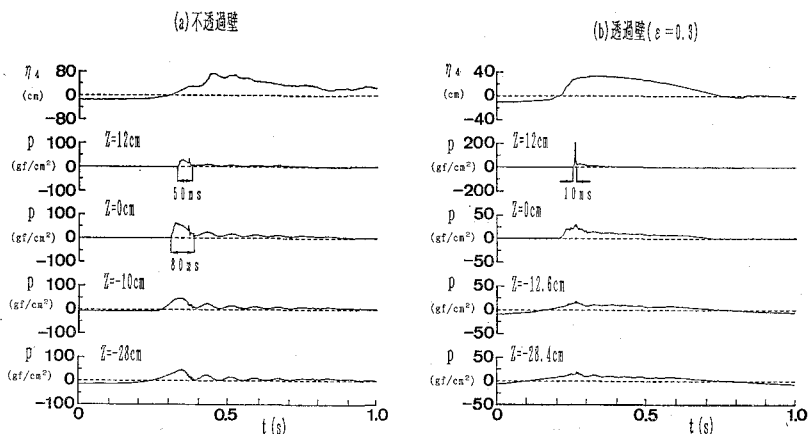
次に、砕波作用下での透過、不透過壁への作用波力の違いを調べた。スリット前面水位(η_4)と静水面上12, 0, -10, -28.0 cm位置における前面波圧の時刻歴を図—3に示す。この場合、模型には巻波砕波が作用している。不透過壁では、スリット前面水位(η_4)の上昇時、前面波圧にピーク値が生じ、また衝撃圧の発生が見られる場合がある。更に、反射の状況によって1波ごとの波面の衝突位置

が水深方向に変動するために、波圧のピーク値の現われる位置がかなり変化する。また、天端付近から水底付近までの各測点においても衝撃力が作用している。一方、透過壁の場合、衝撃力は静水面以上で測定された波圧波形のみに現われている(図—3 (b))。特に静水面上12 cmの波圧は極めて大きく、その最大値は静水面下の波圧の約10倍にも達している。

更に、波圧の位相関係を詳細に調べるために、図—3より1波のみを取り出して図—4に示した。不透過壁の場合、水位の立ち上がりは緩やかであり、その途中において各測点の波圧にピークが生じた。また、波圧波形はピーク値付近において比較的丸みを帯びた形状を持つ。更に、波圧の作用時間 τ は約50~80 msと衝撃圧として比較的長く、その波形はBagnold型(高橋ら, 1983)である。一方、透過壁の場合、不透過壁と比較して水位の変化は急であり、波圧に鋭いピークが現われた。例えば、静水面上12 cmの波圧では、ピーク値が207.3 gf/cm²と不透過壁の波圧に比較して著しく大きく、また作用時間が約10 msと不透過壁と比較してはるかに短い。



図—3 不透過壁と透過壁の前面水位(η_4)と各測点の前面波圧の時刻歴(砕波作用時)



図—4 不透過壁と透過壁の前面水位(η_4)及び前面波圧の時刻歴(1波のみ)

このような波形は衝突する波面と壁面のなす角度がある程度小さい時に発生する Wagner 型 (高橋ら, 1983) の波形と似ている。不透過壁においては、空気の巻き込みによる衝撃力が発生するのに対し、透過壁においては直立した波面が壁面に衝突するとき発生する衝撃力が波力の主因となると考えられる。

4. 重複波の作用する場合の波力算定法

4.1 1枚スリットに作用する波力

スリット壁に作用する波力算定値 F_{XG} は、合田式から空隙率分を差し引いて求めた。

$$F_{XG} = (1 - \varepsilon) F_{XG, WALL} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $F_{XG, WALL}$ は合田波力、 ε は空隙率である。

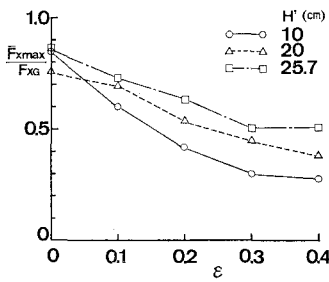


図-5 F_{Xmax}/F_{XG} と空隙率 ε の関係 ($T=2.0s$)

実験値と波力算定値との比 F_{Xmax}/F_{XG} と空隙率 ε との関係を図-5 に示す。ここに F_{Xmax} は水平波力の最大値の平均値であって、 $T=1.6s$ の場合は12波の、 $T=2.0s$ の場合は8波の、 $T=2.2s$ の場合は7波のデータを平均して求めた。 ε の増加にともない F_{Xmax}/F_{XG} は減少する。一方、波高が高くなると、 F_{Xmax}/F_{XG} は大きくなるが、これはスリット間における水粒子速度が速くなるにしたがい、抗力が著しく増大するためである。重複波の作用する場合の F_{Xmax}/F_{XG} を参考のため一覧表として表-1 に示す。結局、スリット式構造物に作用する波力 F_E は、次式で表わされる。ここに、 λ は低減率であり、空隙率や波浪条件によって異なり、表-1 の値を参考として定められる。

$$F_E = \lambda(1 - \varepsilon) F_{XG, WALL} \quad \dots\dots\dots (2)$$

表-1 F_{Xmax}/F_{XG} の一覧表

T	H	1.8 s			2.0 s			2.2 s		
		10.0cm	20.0cm	25.2cm	10.0cm	20.0cm	25.7cm	10.0cm	20.0cm	26.4cm
実験値/合田波力	1 ($\varepsilon=0$)	0.81	0.78	0.90	0.85	0.73	0.88	0.90	0.84	0.99
	2 ($\varepsilon=0.1$)	0.62	0.70	0.89	0.61	0.65	0.74	0.69	0.75	0.88
	3 ($\varepsilon=0.2$)	0.43	0.54	0.67	0.42	0.53	0.64	0.46	0.59	0.68
	4 ($\varepsilon=0.3$)	0.34	0.45		0.30	0.41		0.33	0.42	
	5 ($\varepsilon=0.4$)	0.29	0.39		0.28	0.36		0.29	0.45	

4.2 複数スリットに作用する波力

重複波がスリット式構造物に作用する場合、沖側スリ

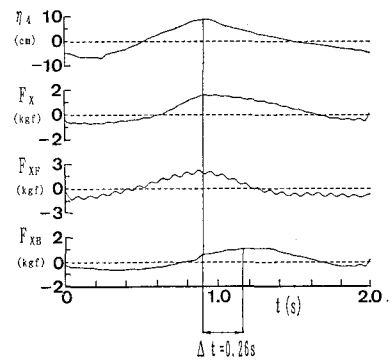


図-6 2枚スリット模型の波力と水位 ($H'=10\text{ cm}$, $T=2.0s$)

ットの前面水位が最高となるとき水平波力は最大となった。このことより沖側スリットの前面水位が最高となった時の中間、岸側スリットの水位を推定すれば、各スリットに作用する波力が求められると考えられる。

そこで、各スリットに働く波力の位相関係を明らかにするために、 $H'=10\text{ cm}$ 、 $T=2.0s$ の波浪条件下における、2枚スリット構造物の模型前面水位 (η_i)、水平波力 (F_X)、沖側、岸側スリットに作用する波圧合力 (F_{XF} 、 F_{XB}) の時刻歴を図-6 に示す。 F_{XB} が最大となる時間は、 F_{XF} が最大となってから $0.26s$ 後となる。この時間差は、進行波の波速から計算される $0.25s$ とほぼ一致しており、スリットの存在により波圧の位相がずれる現象 (角野, 1987) は生じていないことがわかる。

一般に、岸側スリットの波力は、沖側スリットの波力に比べて小さくなる。これは、沖側スリットによって波浪が減衰するためである。そこで、沖側・岸側スリットの水平最大波力より平均水平波力比 $\alpha = (\bar{F}_{Xmax})_B / (\bar{F}_{Xmax})_F$ を求め、1枚スリットの透過率 K_T との関係調べた (図-7)。2枚スリットの場合、 α の絶対値は K_T のそれよりも $0.1 \sim 0.15$ 小さい

が、 α の全体的変化傾向は K_T の変化と良く一致していることがわかる。

同様に3枚スリット構造に作用する波力や水位の時間波形を調べた。最初

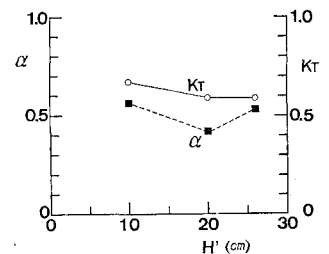


図-7 α と H' の関係

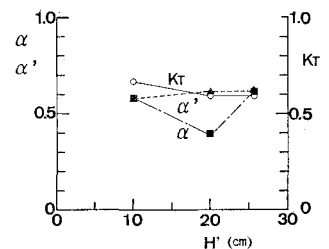


図-8 α 、 α' と H' の関係

に波形を調べると、沖側、中間スリットによって生ずる波力の位相差は2枚スリットの場合とはほぼ同様、無視できる量であった。そこで、更に中間・沖側スリットの平均水平波力比 $\alpha' = (\bar{F}_{Xmax})_H / (\bar{F}_{Xmax})_F$ 、岸側・沖側スリットの平均水平波力比 $\alpha = (\bar{F}_{Xmax})_B / (\bar{F}_{Xmax})_F$ と波壁の関係を調べた(図-8 参照)。3枚スリット模型における各スリット間の相対間隔 B/L は 0.063 と比較的狭い。そのため、中間スリットによる消波効果は有効でなく、中間、岸側スリット間の水位変化が小さいため、 $H' = 20$ cm の場合を除いて波力比はほぼ一定となった。

結局、複数スリット構造物に作用する波力の特性は以下のように要約される。①水平波力は沖側スリットの前面水位が最高となる時刻に最大となる。②スリットの存在による波の位相のずれはほとんどない。③各スリットに作用する波力は透過率とほぼ同程度低下する。④3枚スリット構造物においては、スリット間隔が比較的小さい場合、中間スリットによる波力の低減はほとんどない。

以上の点より、複数スリットに作用する水平波力は、沖側スリットの波力、各スリット位置の水位をもとに計算することができると考えられる。例えば2枚スリットでは、岸側スリット位置での波高は透過率 K_T に比例して減少するから波力も同様な割合で減少すると考え、更に前面スリット位置での水位が最大となった時の岸側スリット位置での水位を有限振幅性を考慮した hyperbolic 波により求めると、全波力 F_{X2} は次式により算定できる。

$$F_{X2} = f_{X1} \left(1 + K_{T1} \frac{\eta_B - \delta}{\eta_F - \delta} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K_{T1} ：沖側スリットの透過率、 f_{X1} (kgf)：沖側スリットに作用する波力、 η_F 、 η_B (m)：沖側、岸側スリット位置における波の谷から測った水位、 δ (m)：波の谷から静水面までの距離である。また図-7によれば、波力の低減率 α は K_T と比較して若干小さいが、安全側を考慮して α の代わりに K_T を用いた。また、2枚のスリット位置での位相差は進行波の空間波形における位相差より算定できることにより、式(3)にその補正項を含めた。

3枚スリットの波力 F_{X3} も同様にして式(4)で求められる。

$$F_{X3} = f_{X1} \left(1 + K_{T1} \frac{\eta_H + \eta_B - 2\delta}{\eta_F - \delta} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 η_H (m)：中央スリット位置における波の谷から測った水位である。スリットの相対間隔 B/L が狭いとき、中間スリット前後での波高変化は小さい。このことから、中間スリットの波浪減衰効果は無視した。パラメータは式(3)の場合と η_H を除き同一であって、 η_H (m) は中間スリット位置における波の谷からの水位である。

2, 3枚スリット構造物に作用する波力を算定し、実験値と比較した(図-9)。計算値と実験値は良く一致し、式(3)、(4)により実用上十分な精度で波力が計算できることがわかる。

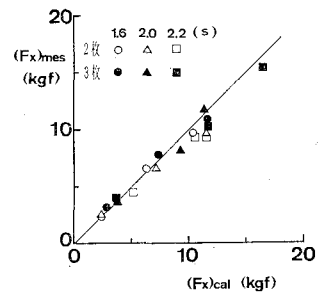


図-9 水平波力 F_X の計算値と実験値との比較

5. 砕波の作用する場合の波力

スリット式構造物に砕波が作用する場合については、実験数が限られていたため砕波力の算定法を提案するまでには至らなかった。しかし、波力についていくつかの新しい知見が得られたので以下に報告する。

最初に、砕波が作用する時の空隙率と波力の関係を調べるために、透過・不透過壁に作用する波力の比と波高の関係を調べた(図-10)。図には比較のため重複波の場合も示す。

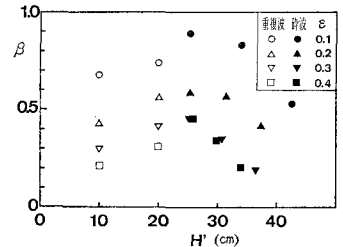


図-10 不透壁に対する水平波力比と H' の関係 ($T=1.6s$)

砕波時も ϵ の増加に伴い波力比が低減するが、波高 $H' = 25.2$ cm において波力比は最大値を取る。また、 ϵ が 0~0.3 では空隙率の増加にともない波力は低減するのに対し、 ϵ が 0.3 と 0.4 では波力比はほぼ同じとなる。それ故、空隙率が 0.3 以上の場合、空隙率を大きくしても、水平波力の低減にはあまり役立たない。

次に、不透過壁、透過壁 ($\epsilon=0.2$) に砕波の作用する時の波圧分布を図-11に示す。図には空隙率を $\epsilon=0.4$ と大きくした場合と、天端高の高いケース ($h_e=27$ cm) の波圧分布も示した。不透過壁では天端付近を除く壁

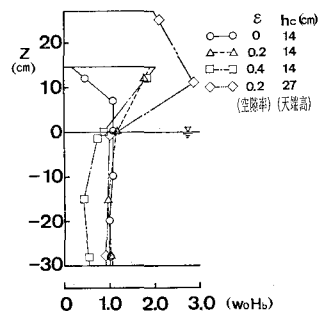


図-11 砕波作用時の波圧の鉛直分布 ($H_b=36$ cm, $T=2.0s$)

面全体において $1.0w_0H_b$ 程度の波圧が作用する。一方、透過壁では、天端付近において約 $2.0w_0H_b$ もの波圧が作用している。これは、この部分において切り立った水面が壁面に衝突するためである。この地点の波圧値は、

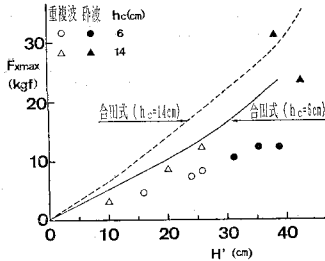
ε が 0.2, 0.4 と変化してもほとんど差が見られない。これに対し静水面より下では ε が増加すると波力の低減が見られる。また、越波の生じない天端高 = 27 cm の場合、直立した波面が衝突する部分において約 $3.0w_0H_b$ と非常に大きな波圧が生じた。以上のことから、天端高が低くなると発生する波圧は低減し、また静水面より下では透過、不透過壁に発生する波圧値はほぼ同じとなることより、天端の低い場合では、合田式の準用が可能と考えられる。そこで、天端高が変化した場合の合田式の適用性を調べるために、天端高 $h_c=6, 14$ cm 模型に作用する平均水平最大

波力を重複波、碎波の場合を含めて図一12に示した。重複波の作用する場合、越波の生じない波浪条件下で波力値が大きく変わらないのは当然であるが、碎波の

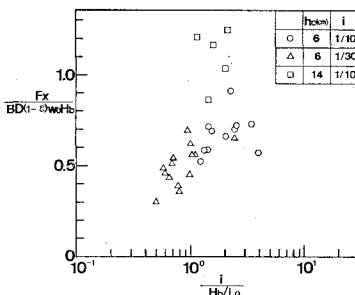
作用する場合、 $h_c=14$ cm の模型の方がかなり大きい波力値を取る。図には合田波力の算定値も示した。合田波力は、天端高の等しい不透過壁を仮定して算定した。天端の低い $h_c=6$ cm の模型では、重複波から碎波に至る全てのケースで合田式のほぼ60%程度に波力が低減した。これに対し $h_c=14$ cm 模型の場合、重複波領域では実験値が合田式の 50~60% であるのに対し、碎波の作用する $H'=38.2$ cm では合田式の約1.1倍となる。つまり高橋らの言うように天端高と碎波波高の比が0.3以下では衝撃力の影響がそれほど大きくならない。

結局、構造物の天端高が比較的 low、碎波が作用しても波頭が越波する場合には、合田式を準用して全波力を求めて良いと考えられる。

次に、透過性構造物に碎波の作用する場合において、



図一12 天端高 $h_c=6, 14$ cm 模型に作用する平均水平波力



図一13 無次元波力 $F_x/BD(1-\varepsilon)w_0H_b$ と $i/(H_b/L_0)$ の関係

碎波形式と波力の関係を調べるために、無次元波力 $F_x/BD(1-\varepsilon)w_0H_b$ (B : 模型幅, D : 模型天端高と水深の和) と $i/(H_b/L_0)$ の関係を調べた (図一13)。水路勾配 $i=1/30$ において、 $i/(H_b/L_0)$ が 0.5~1.0 の間で無次元波力は急増している。これは、この領域が巻波と崩れ波の境界であるためである。また、 $i/(H_b/L_0)$ が 1 を越えると巻波碎波が作用するため無次元波力はほぼ一定となる。一方、 $h_c=14$ cm の場合、 $h_c=6$ cm と比較すると波力値は大きく、波浪条件ごとに散らばりが大きい。天端高の高い場合、切り立った波面が衝突するため衝撃力が大きく、また波浪条件ごとに波面の衝突の状況が異なるためデータは大きく散らばる。

6. 結 論

① 空隙率 ε が増加すると、スリット式構造物前面に作用する波圧波形には、不透過壁の場合に見られる双峰型波形が生じなくなり、単峰型の波形を示す。

② 不透過壁では、空気巻き込みによる衝撃力が発生するのに対し、透過壁においては直立した波面が壁面に衝突するとき発生する衝撃力が波力の主因となる。

③ 複数スリットに作用する水平波力は、沖側スリットの波力、各スリット位置における水位の値を用いて算定できる。

④ 碎波作用時、 ε が 0~0.3 では空隙率の増加にともない波力は低減したのに対し、 ε が 0.3 と 0.4 では波力比はほぼ同じとなる。それ故空隙率が 0.3 以上の場合、空隙率を大きくしても、水平波力の低減にはあまり役立たない。

⑤ 構造物の天端高が低く、碎波が作用しても波頭が越波する場合、合田式を準用して全波力を求められる。

参 考 文 献

- 合田良実・柿崎秀作(1966): 有限振幅波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, 第5巻, 第10号, pp. 1~57.
- 近藤俊郎・佐藤隆一(1979): 多孔壁の損失係数と見かけのオリフィス長さの推定, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 333~337.
- 角野昇八(1987): 鉛直スリットを有する海岸・海洋構造物の周辺波動場に関する研究, 学位論文, 171p.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴村論司(1983): 直立壁に作用する衝撃碎波力の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第22巻, 第4号, pp. 3~31.
- 萩原遼弘・藤原隆男・宇多高明(1988): スリット型海域制御構造物の透過率, 反射率, および全波力の解析, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 532~536.
- 堀口孝男・布施一郎・上原正晴(1977): 両面多孔壁消波構造の水理解析, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 276~280.