

直立消波構造の波圧算定法の一試案

岡 本 博*

1. ま え が き

特殊な形状をしたプレキャストのコンクリートブロックを積み重ねて構築する直立消波構造が各地で施工されている。これらの多くは主に岸壁あるいは護岸構造であるが港内や地形的に閉ざされた水域では防波堤あるいは波除堤の施工例もみられる。直立消波構造が防波堤として使用される場合、安全で経済的な構造設計のためには構造体に作用する波力をできるだけ正確に算定する必要がある。これまでのところ、直立消波構造への作用波力の一般的な波力算定法が確立されていない。本研究は模型実験によって波の諸条件と構造の安定性との関連を調べ、直立消波構造の一般的な波力算定法の提案を試みるものである。本算定法は実際に施工された構造の追跡調査を行なっておらず実験条件も必ずしも広い範囲を網らしていないので十分なものではないが概略の作用波力算定の目安になるものと考えられる。今後、経験や研究の成果が蓄積され適切な波力の算定法が確立されていくことが望まれる。

2. 波圧算定式の仮定

予備的な試験の結果、砕波の作用時には直立消波構造体は波圧減殺効果を有することが認められたので設計波圧式を従来の広井公式、サンフルー式を参照して次のように仮定した。期待滑動量の考え方や合田による波圧算定式の提案をみた現在、同様の手法で波圧算定式の検討を行うことが必要であると考えられる。今後の課題として取り組んでいきたい。

(1) 重複波圧

$d'/H \geq 2.0$ の条件を満足する場合は重複波が作用すると考えて、図-1 に示すサンフルー波圧式を用いるものとする。

$$p_1 = (p_2 + w_0 h) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$p_2 = \frac{w_0 H}{\cosh(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (2)$$

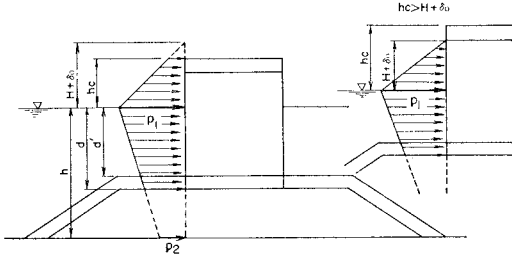


図-1 重複波圧作用図

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (3)$$

上式中の波高 H および波長 L はそれぞれ構造物計画位置での進行波としての波高および波長を用いる。 w_0 は海水の単位体積重量である。

(2) 砕波圧

$d'/H < 2.0$ の時は堤体には砕波が作用すると考えて、図-2 に示す砕波圧式を用いるものとする。直立消波構造の場合波圧減殺効果が認められるので広井式中の波圧係数に波圧減殺定数 α ($0 < \alpha < 1$) を導入して

$$p = 1.5 \alpha w_0 H \dots\dots\dots (4)$$

とする。

式中の波高 H は防波堤計画位置での進行波としての波高を用い、波高が水深で規制される場合はその水深での限界砕波波高 H_b を用いるものとする。

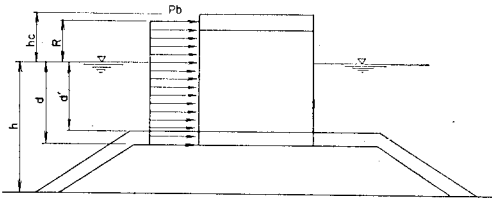
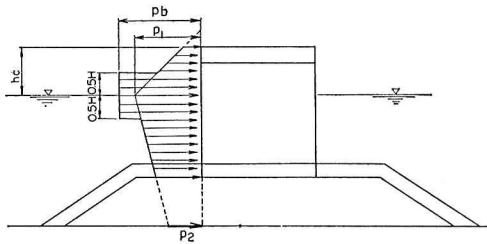


図-2 砕波圧作用図

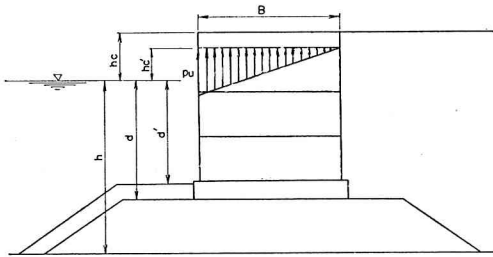
(3) 部分砕波圧

$d'/H \geq 2.0$ であっても、波形勾配の大きな波などのように部分砕波が生じる時には図-3 に示す部分砕波圧式を用いる。静水面を中心に上下 $0.5H$ の範囲を砕波圧とし、他の部分は重複波圧とする。

* 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所



図—3 部分碎波圧作用図



図—4 揚圧力作用図

(4) 揚 圧 力

直立消波構造の場合、堤体内に空隙を有するため、上部工あるいは壁体には揚圧力が作用する。揚圧力としては図—4に示す三角形分布を仮定する。

$$p_u = p_1 \quad \text{ただし} \quad d'/H \geq 2.0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$p_u = p_b \quad \text{ただし} \quad d'/H < 2.0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

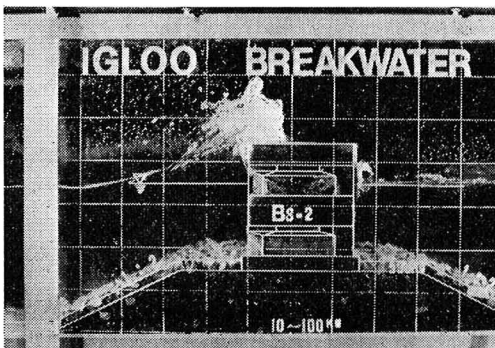
p_1 , p_b はそれぞれサンフルー式、広井式で求められる最大波圧強度である。

3. 水理模型実験

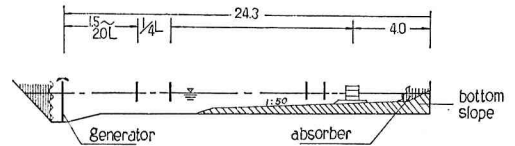
写真—1に示すように、2次元水路内に異型ブロック(イグルー)を積み上げた直立消波構造を設置し、水深と波浪および堤体の諸元を種々変化させて本構造の挙動を調べ、試験の結果と先に仮定した設計波圧式の関連を調べた。

(1) 実験方法と実験条件

実験は、日本テトラポッド(株)応用水理研究所所有の2次元造波水路を使用した。水路の規模は、長さ 29.4



写真—1 実験状況



図—5 水槽および模型配置図(m)

m, 高さ 1.0 m, 幅 0.5 m で片面ガラス張りである。造波性能としては周期 1.0 sec ~ 3.0 sec, 最大波高 30 cm (周期 2.0 sec 時), 造波機はフラッタータイプである。水槽および模型配置を図—5に示す。

実験縮尺は幾何縮尺 1/25 の歪なしとした。水路床はモルタル固定床、堤体模型は砕石マウンドおよびモルタル製の上部工、イグルー、底版ブロック模型とした。モルタル製模型の比重は 2.3 で「イグルー」模型の重量はおよそ 1660 gr ~ 2110 gr である。模型を積み重ねた場合、各ブロックに滑動防止のために設けるホゾは、設計式との対応を調べる実験の性質上、模型では取り除いた。波高の測定には容量式波高計を用いた。入射波高は模型堤体の計画位置付近に設置した 1/4 波長離れた 2 本の波高計の平均値として求めた。また、水路内の一様水深部に設けた 2 本の波高計によって測定した波高にショールディングの効果を考慮して求めた理論上の波高と計画位置での波高を対応させ両者の間に大きな違いのないことを確認した。水路端からの反射波を極力少なくするようにサンフレックスによる消波工を水路端に設けた。模型床勾配は 1/50 の一様勾配とした。

なおブロックの挙動は目視によって判定した。安定、不安定の判断は困難であるので本実験では、数波の規則的な実験有効波を数回繰り返して作用させ各波と滑動状況を一波一波対応させて、少しでも移動が認められる時の波高を安定限界波高、模型上で 1~2 mm 以上動いた場合を不安定として実験結果を整理した。

実験条件は表—1に示す。表中の記号の意味は次のとおりである。

B : 堤体幅

h : 構造物設置水深

T : 波の周期

L : 波長

d : マウンド天端水深

h_0 : 静水面から防波堤天端までの距離

h_0' : 静水面からイグルー天端までの距離

d' : マウンド被覆石天端水深

また表中のケース 11~40 はケース 1~10 と同様の実験条件を意味している。

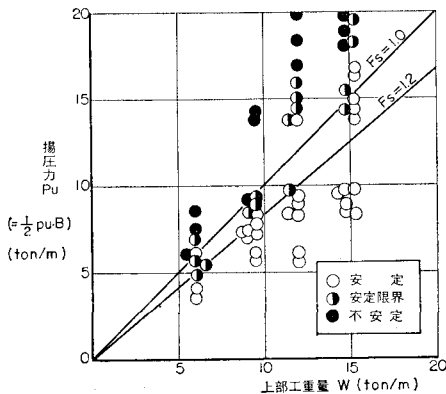
(2) 実験の結果

a) 揚 圧 力

2. (4) 項で仮定した揚圧力の算定法の妥当性を調べる

表—1 実験条件一覧表

Case	Block type	B (cm)	h (cm)	T (sec)	L (cm)	d (cm)	h _c (cm)	h _c ' (cm)	d' (cm)	d'/h	h/L
1	IGLOO Bs-2 (1 660 gr)	20	16	1.2, 2.0	139, 244	12	11.6	7.6	10	0.625	0.115, 0.066
2			16	"	"	8	10.0	6.0	6	0.375	"
3			20	"	152, 271	16	7.6	3.6	14	0.700	0.132, 0.074
4			20	"	"	12	6.0	2.0	10	0.500	"
5			24	"	163, 294	16	13.2	9.2	14	0.583	0.147, 0.082
6			24	"	"	12	11.6	7.6	10	0.417	"
7			28	"	173, 314	20	9.2	5.2	18	0.642	0.162, 0.089
8			28	"	"	20	14.8	10.8	18	0.642	"
9			28	"	"	16	7.6	3.6	14	0.500	"
10			32	"	181, 335	24	5.2	1.2	22	0.689	0.177, 0.096
11~20	IGLOO Bs-3 (1 970 gr)	22	16~32	"	139 244 181, 335	8~24	5.2~14.8	1.2~10.8	6~22	0.375 ~0.700	0.115 0.066 0.177, 0.096
21~30	IGLOO Bt-2 (1 800 gr)	24	16~32	"	"	"	"	"	"	"	"
31~40	IGLOO Bt-3 (2 110 gr)	26	16~32	"	"	"	"	"	"	"	"



図—6 揚圧力算定式と実験結果の比較
(上部工単独の場合の安定性)

ため、波による堤体の背後への滑動を拘束した状態で上部工あるいは最上段ブロックの上下方向の挙動を調べた。上下方向の移動が目視によりわずかでも認められる場合を不安定と定義して揚圧力と上部工重量あるいは最上段ブロック重量の関係を求めた結果を図—6に示す。図中の W は上部工の空中重量 (ton/m), B は上部工断面幅 (m) である。もし、はじめに仮定した揚圧力の大きさが妥当であるならば $W > 1/2 p_u \cdot B$ の範囲では上部工は安定であり、逆に $W < 1/2 p_u \cdot B$ の範囲では堤体は不安定という実験結果が得られることになる。図—6 から $F_s = 1.0$ の線を境に上側で不安定、下側で安定、 $F_s = 1.0$ 付近に安定限界があり、この結果ははじめに仮定した揚圧力の見積りが、分布形状や作用位置はともかくとしてほぼ妥当なことを示すものである。

ただし、揚圧力強度 p_u は、 $p_u = p_i$ ($d'/H \geq 2.0$ の時), $p_u = p_b$ ($d'/H < 2.0$ の時) として求めた値であり、この p_i , p_b の値の見積りが妥当なものであるか否かは、次項以降にふれるものである。

図—6 に示した実験結果はクリアランス h_c' が波高に

比較して小さい場合 ($h_c' < 0.5H$) の結果でありクリアランスが大きい場合 ($h_c' \geq 1.0H$) は、揚圧力の減少が期待されるが、通常の設計条件の範囲では天端高の制限があって $h_c' \geq 1.0H$ となる設計はまれである。また、上部工が静水面下に没する場合は上部工重量は水中重量を用いるものとする。

b) 波圧減殺定数 (α)

$d'/H < 2.0$ なる条件の下では砕波が作用すると考え、砕波の作用時の波圧減殺定数 α を実験により求めた。滑動力は水平波力 P_H で与えられる一方、滑動に抵抗する抵抗力は $\mu(W - P_V)$ で与えられる。

$$P_H = (R + d') \cdot (1.5 \alpha w_0 H) \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

上式中の R は静水面上の砕波圧の作用高さで $1.0H$ を仮定する。波圧減殺定数 α は、実験の結果得られた安定限界波高を代入して求めた水平波力 P_H がちょうど、

$$P_H = \mu(W - P_V) \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

を満足するよう試行錯誤的に求めた結果、 $\alpha = 0.8$ とするとはほぼ実験結果を満足することが明らかとなった。すなわち水平波圧強度 p_b は

$$p_b = 1.5 \times 0.8 w_0 H = 1.2 w_0 H \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

により求めることができる。なお式 (9) 中の μ は摩擦係数でコンクリートとコンクリート面では $\mu = 0.5$, コンクリートと砕石面では $\mu = 0.6$ とした。なお浮力は越波の有無にかかわらず静水面下だけにのみ作用するものとし、2. (4) 項に示す三角形分布の揚圧力を考えるものとする。 P_V は揚圧力合力, W は浮力を考慮した堤体重量である。

c) 波圧算定式と水理実験結果の比較

重複波圧, 砕波圧, 部分砕波圧についての仮定した波圧算定式の妥当性を検討するため、揚圧力の場合と同様縦軸に水平波力, 横軸に抵抗力をとって実験結果をプロットしたのが図—7である。抵抗力に比較して水平波力が大きい場合(図—7の左上半分) 実験で堤体が不安定となり、逆に水平波力に比較して抵抗力が大きい場合(図

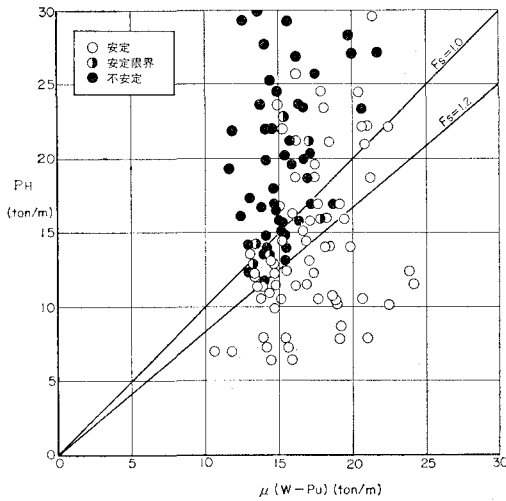


図-7 波圧算定式と水理実験結果の比較

の右下半分) 堤体は安定となっている。

$F_s = 1.0 \sim 1.2$ の範囲で堤体が不安定となる結果が数例あるが、実験ではブロックに滑り防止用ホゾを設けていないこと、安定限界の基準を比較的厳しく定義したことなどを考慮するとほぼ妥当な波力の算定法であるといえることができる。

d) 波圧算定式の適用範囲

$d'/H = 2.0$ を境界に重複波圧式と砕波圧式の適用を変えるが、水深とマウンド厚、波高、波長の条件によっては衝撃的な砕波圧を生じることがある。今回行った一連の試験の結果や一般の直立壁に作用する波圧の試験結果をもとに衝撃砕波圧の作用範囲を求めた結果を図-8に示す。

図は $h/L \geq 0.07$ の条件の下での衝撃砕波圧の発生範囲を示すもので $h/L < 0.07$ の場合にはさらに衝撃砕波圧の発生範囲は広がるものと考えられる。

図に示す条件の範囲では平均波圧強度 p_b が $p_b \geq 1.2 w_0 H$ となる可能性があるため、諸条件がこの範囲に含まれるような設計は極力避けねばならない。

e) 設計波高について

本算定法における波高は規則波を用いた水理実験における波高に対応しており、したがって実際の設計においては、防波堤計画位置に襲撃する波群中のどの波を設計波高として代表させるかが問題となる。波高が水深で限定される場合には、その水深での限界砕波波高 H_b (m)

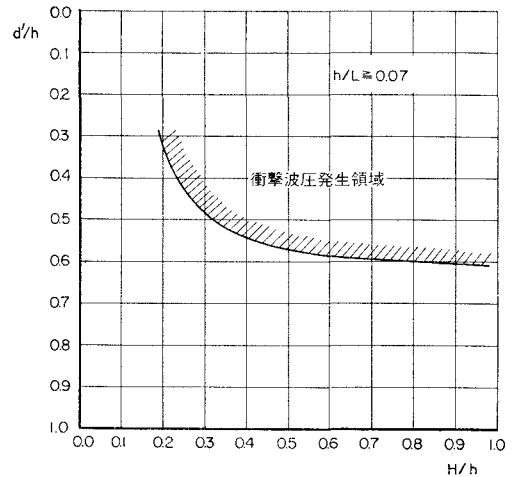


図-8 波圧算定式の適用範囲

を使用することができるが、その他の場合、設計波に有義波～最大波の中のどの波を選ぶかという困難な問題が残ることになる。著者らが先に行なった不規則波による安定実験からは、ほぼ 1/10 最大波を規則波に対応させた時に類似の滑動状況を示すという結果が得られている。したがって設計の際には波浪の発生原因、継続時間、構造物の重要度などを考慮して主任技術者の判断に基づいて適切な設計をすることが望まれる。

4. 結 論

直立消波構造の一般的な波力算定法の提案を試みた。その主な内容は次のとおりである。

(1) 水平波圧強度は重複波が作用する場合はサンフルー式により求めることができる。また、砕波が作用する場合は広井公式に、波圧減殺定数 $\alpha = 0.8$ を乗じて求めることができる。

(2) 揚圧力は越波の有無にかかわらず最大揚圧力強度 $p_u = p_1$ または $p_u = p_b$ で与えられる三角形分布で作用するものとする。

(3) 浮力は越波の有無にかかわらず静水面下にのみ作用するものとする。

参 考 文 献

- 1) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，p. 2-4-19～2-4-28。