

消波ブロックの水理的特性

富永正照*・首藤伸夫**橋本宏*

1. まえがき

海岸構造物において消波の目的をもって各種のブロックが使用されている。これらの消波ブロックはブロック内の空げきによって波のエネルギーを消費させることが目的である。エネルギー損失が各種のブロックについてどの程度となるか、またそれはどのような量によって支配されているのかについて模型実験によって調べたので、この結果について報告する。ブロックによるエネルギー損失を統一的に説明することができれば消波ブロックを使用する構造物、たとえば防波堤、消波堤、潜堤などの設計に際してもエネルギーの消費効果を知ることができると考えられる。

模型実験は定常流中に置かれた場合とU字型をした管によって発生する振動流中に置かれた場合について行なわれた。

2. 実験方法

定常流についての実験は幅 50 cm、長さ 20 m、高さ 50 cm の傾斜水路を使用して行なわれた。水路中にブロックを積んで、ブロックの前後の水深を測ることによって損失水頭の測定を行なった。使用したブロックはテトラポッド、中空三角ブロック、六脚ブロックの3種類で

図-1 ブロックの積み方

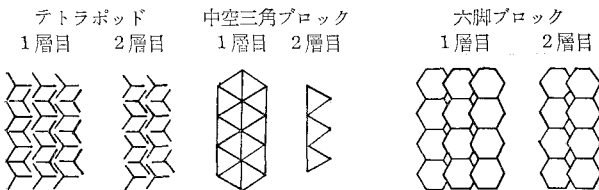
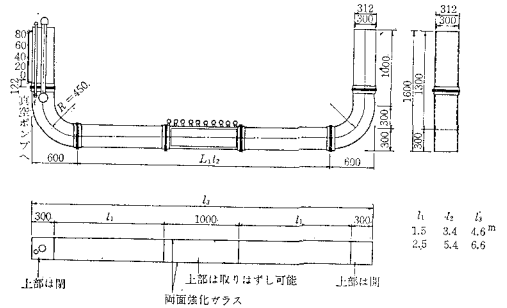


表-1 定常流の実験条件

ブロック名称	テトラポッド				中空三角ブロック				六脚ブロック		
ブロック重量 (g)	1000	500	250	125	1000	500	250	125	1000	500	250
高さ (cm)	15.9	12.6	10.0	8.1	12.1	9.6	7.6	6.0	15.8	12.5	9.9
幅 (cm)	44.0	47.8	45.0	49.0	46.2	49.0	49.0	49.0	45.5	43.5	49.0
長さ (cm)	39.0	27.5	23.0	18.5	28.0	22.5	18.0	14.0	33.0	24.8	20.6
流量	0.5~5.5 l/sec				水路勾配 0						

注：高さ、幅、長さはブロックを2層3列に積んだ場合の値であり、これを2組並べれば長さは約2倍となる。

図-2 振動流発生装置



あり、それぞれ 1000 g、500 g、250 g、125 g のものを使用した。ブロックの積み方は2層3列で1組とし、1組および2組の場合について実験を行なった。配列の概略を図-1に示す。

振動流については図-2に示すようなU字管を使用して行なった。これは 30×30 cm の長方形断面で水平部の長さを変えることができるようになっている。中央部はガラス張りとなっており、ここにブロックを置いて実験を行なった。管の一端は閉じられており、初めに真空ポンプによって水位を上げておき、バルブを開くことによって振動する流れが発生する。水位は開いた部分に電気抵抗式水位計を取付けて測定し、オシログラフに自記させた。ブロックは管全断面をみたすように積んだ。ブ

ロックの高さと管の高さは整数倍になっていないために空げきができるがここにはブロックを打ち欠いたものを填めた。側壁との間も同様である。また上部のブロックが崩れないように紐によって固定した。なお図-2に示す装置では空気流出入用のバルブおよびこれに接続するパイプによる損失があるためにブロックを置かない場合でも相当

振動は減衰する。これらについては現在改造して実験中である。

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

** 正会員 中央大学助教授 理工学部土木工学科

表—2 振動流の実験条件

ブロック名称	ブロック重量(g)	l (cm)	L (cm)	ϵ	R (cm)
テトラポッド	1000	585.7	37.0	0.638	2.15
	500	"	29.0	0.643	1.47
	250	"	24.0	0.637	1.28
	1000	785.7	37.0	0.638	2.15
	500	"	29.0	0.643	1.47
	250	"	24.0	0.637	1.28
中空三角ブロック	1000	585.7	54.4	0.645	1.61
	500	"	56.2	0.683	1.37
	250	"	35.0	0.645	1.02
六脚ブロック	1000	585.7	30.2	0.653	1.69
	500	"	25.6	0.682	1.55
	250	"	20.8	0.693	1.21
中空三脚ブロック	1000	585.7	34.5	0.623	1.32
初期水位	30, 20, 10 cm				

定常流および振動流についての実験条件は表—1, 2のとおりである。

3. 実験結果

ブロックによるエネルギー損失は空げきを通過する水の方の方向の変化, 断面積の変化などの際の乱れによるものと摩擦によるものがある。ブロックにおいては摩擦よりも形の抵抗によるものが大きいと考えられる。このために損失に影響する量としてはブロックの空げきの平均的な大きさのみならず空げきの大きさの分布, 配列状態によっても異なる。空げきの大きさの分布, 配列についてはブロックが決まれば特に変わった積み方をしない限りは同じであると考えられる。ここでは空げきの平均的な大きさと損失の関係について検討を行なった。

ブロックによる損失をつぎのように表わす。

$$h_l = f \cdot \frac{L}{R} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, h_l : 損失水頭, L : ブロックの長さ, f : 抵抗係数, R : ブロックの空げきの代表径, v : 流速, g : 重力の加速度である。

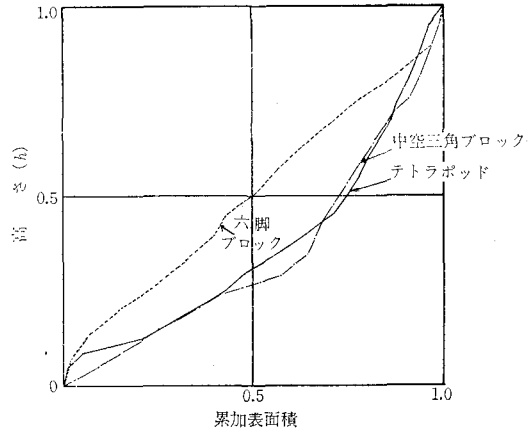
ここで問題となるのは R として何を採るかということである。これについては種々の考え方があるが, ここでは径深に相当するものをとる。すなわち空げきの断面積を, 空げきをかこむ長さで割ったものである。空げきを平均値で代表させれば, ブロックの空げき率を ϵ とするとつぎようになる。

$$R = \frac{\epsilon \cdot V}{A} \quad \dots\dots\dots (2)$$

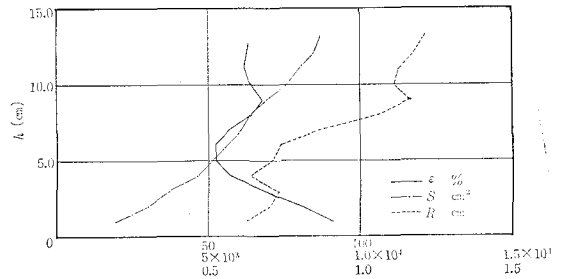
ただし, V は長さ L のブロックをかこむ体積, A : ブロック表面積, である。

1 個のブロックの表面積は各高さごとに図—3のように示される。これは計算および実測によって求め, 全高および全表面積とのもてで示したものである。空げき率および R についてはブロックの積み方, 水深などによ

図—3 ブロック表面積



図—4 空げき率, 表面積, 径深 (テトラポッド 500 g)



って異なるため実験と同じ条件における空げき率の測定を各水深ごとに行ないそれぞれの R を求めた。500 g テトラポッドについて定常流での値を示すと図—4となる。

(1) 定常流における損失

定常流中のブロックによる損失は式 (1) で表わされ, 流速を空げき断面を通過する値とするとつぎようになる。

$$v = \frac{Q}{Bh\epsilon^{2/3}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, Q : 流量, B : 水路幅, h : 平均水深 ($= (h_1 + h_2)/2$), h_1 : ブロック前面の水深, h_2 : ブロック後面の水深。

実験結果は図—5のように示される。これは f/R と R の関係を示したものである。また図—6には f と $R_e = vR/\nu$ で定義される Reynolds 数の関係を示す。テトラポッドと中空三角ブロックはほぼ同じ結果となり六脚ブロックは異なっている。これは図—3の表面積の関係でも同じことがいえる。これはブロックが上下対称でなく空げきの配置が異なるためと考えられる。六脚ブロックについては f は R_e の関数ではなく定数となるようであるが実験の範囲がせまいために明らかではない。また管路中に球が置かれた場合の尾崎博士らの実験結果と比較すると六脚ブロック以外はほぼ同じ値をとっている。

図-5 (a) テトラポッド

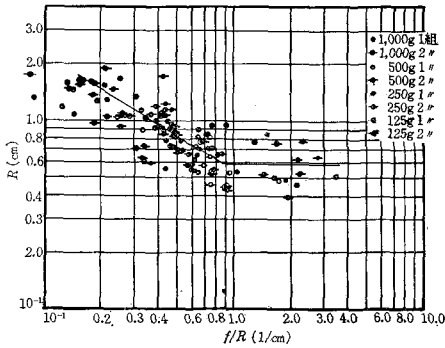


図-5 (b) 中空三角ブロック

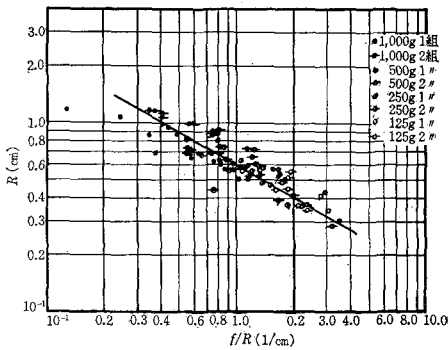


図-5 (c) 六脚ブロック

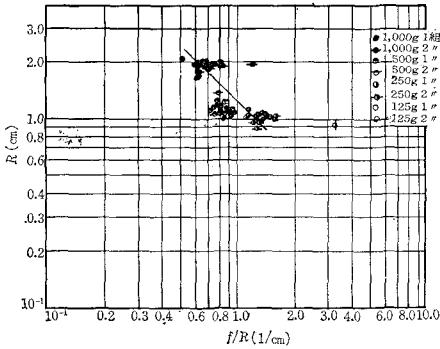


図-6 (a) テトラポッド

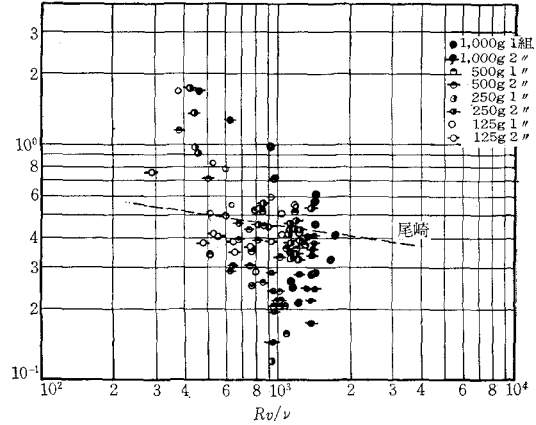


図-6 (b) 中空三角ブロック

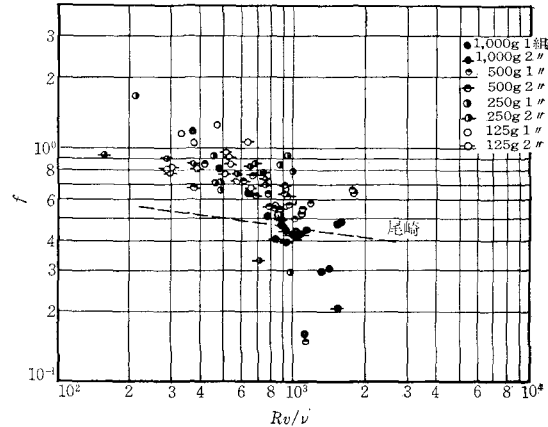
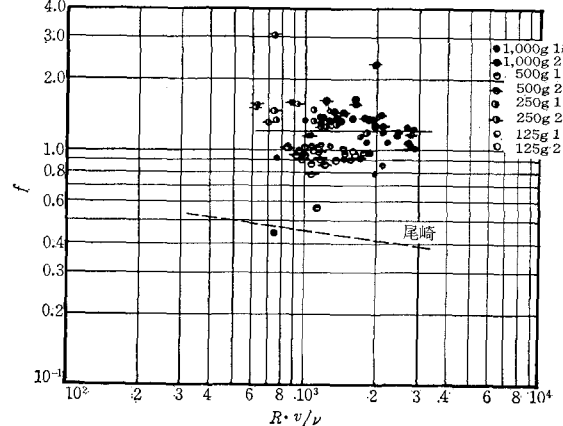


図-6 (c) 六脚ブロック



(2) 振動流中の損失

波のように非定常状態における損失が定常流中における損失と同じものであるか、また違うとすればどのように異なるかなどについて振動流中にブロックを置いて調べた。

図-2 に示すようなU字管の運動の式はつぎのように表わされる。

$$\frac{l}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + 2z \mp h_l = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 l : 管の長さ、 z : 平均水面からの高さ、 h_l : 損失水頭、また連続の式は、

$$\frac{dz}{dt} = -v \quad \dots\dots\dots (5)$$

ブロックを置かない場合の損失水頭をつぎのように表わす。

$$h_l = f_1 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (6)$$

f_1 は主に空気流出入管のバルブおよび曲りによるものが主であり管の側壁の摩擦はほとんど影響しないと考えられる。

またブロックのある場合は、

$$h_l = f_1 \frac{v^2}{2g} + f_2 \cdot \frac{L}{R} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

であり, $Av=av_2$ より

$$h_l = f_1 \cdot \frac{v^2}{2g} + f_2 \cdot \frac{L}{R} \cdot \left(\frac{A}{a}\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし, L : ブロックの長さ, A : 管断面積, a : 空げき断面積, である。

以上の関係を式(4)に代入し式(5)を用いると,

$$\frac{d^2 z}{dt^2} \mp \left\{ \frac{f_1}{l} + f_2 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{l} \cdot \left(\frac{A}{a}\right)^2 \right\} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + \frac{2g}{l} z = 0 \dots\dots\dots (8)$$

となる。符号は $dz/dt \geq 0$ のとき-, $dz/dt < 0$ のとき+をとる。ここで,

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{2f_1}{l} + \frac{2f_2}{D} \cdot \frac{L}{l} \cdot \left(\frac{A}{a}\right)^2 \\ m_1 &= \frac{2f_1}{l}, \quad n^2 = \frac{2g}{l} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

とおくと式(8)はつぎのようになる。

$$\frac{d^2 z}{dt^2} \mp \frac{m}{2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + n^2 z = 0 \dots\dots\dots (10)$$

これは近似的に解けてつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} z &= a \cos \varphi \\ a &= \frac{a_0}{1 + \frac{4n}{3\pi} \cdot \frac{m}{2} \cdot a_0 t} \\ \varphi &= nt + \frac{3ma_0 C}{2\pi} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2nm}{3\pi} a_0 t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

a_0 は $t=0$ における振幅, $C=0.0407$ である。

またピーク値については式(10)は解けて, 振動のピーク値の間にはつぎの関係式が成立する。

$$\log_e(1+Y_0) - Y_0 = \log_e(1-Y_1) + Y_1 \dots\dots\dots (12)$$

ここで $Y_i = m \cdot Z_i$, Z_i : ピーク値である。

ブロックのない場合におけるピーク値の関係を図-7に示す。 $l=585.7$ cm, 785.7 cm について m の値を求めると表-3 のようになり, f_1 は l によらないと考えられる。

図-7 振動の振幅 (ブロックなし, $l=585.7$ m)

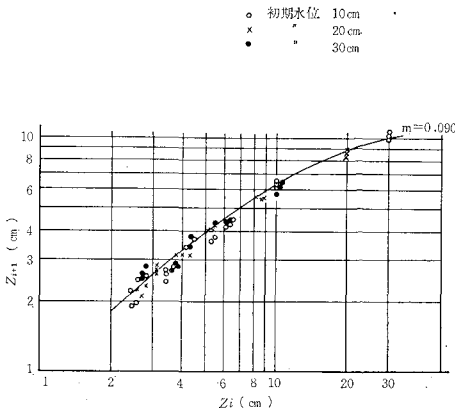


図-8 振動の振幅 (テトラポッド 1000 g, $l=585.7$ cm)

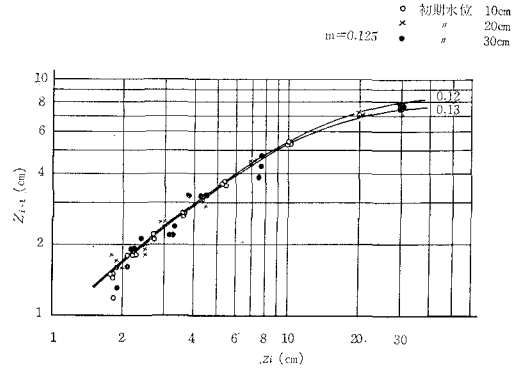


図-9 抵抗係数

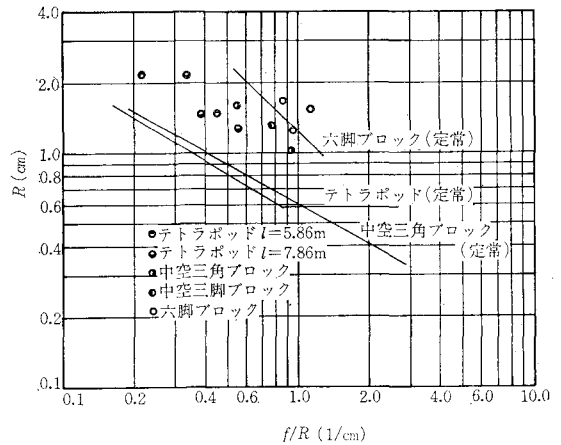


表-3

l (cm)	m_1 (1/cm)	f_1
585.7	0.090	26.3
785.7	0.065	25.5

各ブロックについて

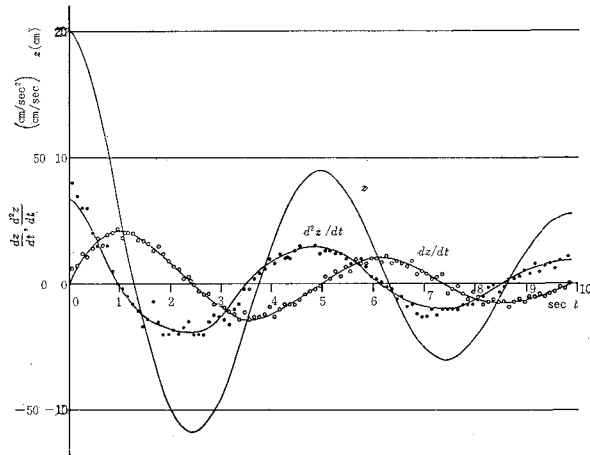
の m の値をピーク値から求め式(9)より f_2/R を求める。この

際, $(A/a)^2 = \epsilon^{4/3}$ として計算を行なった。なお一例としてテトラポッドの場合についてピーク値を示したものが図-8である。

図-9に f_2/R と R の関係を示す。これには定常な場合の結果も合わせて示してある。振動流での f は定常流の場合に比較して少し大きになっている。これが振動によるためか, またはブロックの積み方が幾分異なるためによるものかは明らかでなく, さらに検討を必要とすると考えられる。

抵抗係数 f の値が実験の範囲で流速, すなわち Reynolds 数によって変化するものであるかどうかを振動の波形から検討を行なってみる。波形 z の時間的变化から dz/dt , d^2z/dt^2 を求める。またピーク値から m を求めてこれとさきに求めた dz/dt より $\pm m/2(dz/dt)^2 - n^2 z$ を計算し, d^2z/dt^2 と比較したものが図-10である。 d^2z/dt^2 の実線が dz/dt と z から求めた値であり, 黒円が dz/dt の時間的变化から求めた値である。この結果に

図-10 変位, 速度, 加速度の時間的变化



よれば計算値はばらついておりあまり明らかなとはいえないが h_l はほぼ v^2 に比例すると考えてもよいと思われる。なお 図-10 は $l=11.86$ m で, 中空三角ブロックを使用して行なった結果である。

振動の周期については式 (11) の第1近似 $n=2\pi/T$ より得られる結果にほとんど一致していて第2項の補正は最大でも 4% 程度である。周期の値は $l=585.7$ cm,

785.7 cm に対して, 3.43 sec, 3.98 sec である。

4. 結 語

ブロックのエネルギー損失について模型実験を行なったところつぎの結果が得られた。

定常流中で実験を行なった結果抵抗係数 f の値は 0.2~2.0 程度であり, テトラポッドと中空三角ブロックはほぼ同じ値を示すが六脚ブロックは異なっている。

振動流中での結果は定常流の場合と抵抗係数は同じ傾向を示すが, 値はいくぶん大きくなっている。また損失水頭は流速の 2 乗にほぼ比例すると考えてもよいと思われる。この点については実験の精度をあげてさらに検討する必要はあろう。また波のように自由表面を持つ場合にはどのように考えるべきかは残された問題である。

参 考 文 献

- 1) ボゴリューボフ, ミトロポリスキー (益子正教訳): 非線型振動論, 共立出版。
- 2) 本間・石原編: 応用水理学 (上), 丸善。
- 3) 海岸堤防の根固工に関する 模型実験報告書, 土木研究所資料, 第 187 号, 昭和 41 年 8 月。
- 4) 尾崎・猪狩: 捨石構造における 空げきの効果に関する基礎的研究 (I), 土木学会年次学術講演会, 昭和 42 年。