

消波ブロックの抵抗について

首 藤 伸 夫*

1. 序

現在各所で、種々な形の人工ブロックが数多く使用されているが、それらブロック構造物による波の反射率、透過率といった基本的とおもわれる事がらでさえ、数量的に明確に予測することができないのが現状であろう。その理由のひとつは、空げき構造物上における境界条件をいかに表現するかということにあり、また、人工ブロックのような空げき構造物内での抵抗をどう表現するかという点に他の難点がある。最初の難点は、長波の近似を用いること、空げき率があまり小さくない場合を考えると等の取扱いをすることによって、しだいに克服されてきている。たとえば、Le Méhauté¹⁾ は、捨石型防波堤を透過する波の近似計算を行なって実験値と比較しているし、Lean²⁾ は、実験用波消しの効果を同様の考え方に基づいて計算できることを示している。この両者の取扱いにおいては、空げき構造物中での抵抗は、空げき構造物がきわめて大きな空げきを有するとみなすか、または砂利層の抵抗を計算にくみ入れることによって処理されている。具体的には、非線型の抵抗項を一周期間にわたって平均した等価線型抵抗に換算して計算する。したがって、消波ブロックの抵抗特性を明確に表わすことができるならば、現状においても、第一近似ではあるが、消波ブロックによる透過反射の程度を近似計算することが可能である。空げき構造物の水理的抵抗を表現するための諸研究は、数多くのものがあるが^{3), 4), 5), 6)}、人工ブロックをその明らかな対象としたものは、まだ多くないようである^{7), 8)}。本論文は、前回にひきつづき、ブロック類の抵抗の表現に有利なモデルは何であるかを探索したものである。従来の研究には、水理径を用いたものの⁷⁾、相当粗度という考え方⁸⁾などがあつた。筆者らの前報文では、水理径を使用した管抵抗モデルによっていたが、中空三角ブロックをのぞいては、あまり良いモデル化とは、いえなかった。本報文では、六脚ブロックを例にとり、別の良い表現方法があるか否かを調べることとする。

ブロック構造物は、空げきが必ずしも等方的に配列しているとは限らず、高さや平面的な場所の差によって異なりうるものであるけれども、あまり細分して考えるの

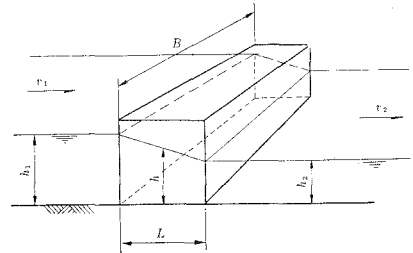
は実用上不便である。われわれの究極の目的は、ブロック構造物による波の反射、透過などを数量的に計算することである。波動現象は時間的な水位の上下をもたらし、その瞬間瞬間の抵抗の違いを計算にとり入れることはできないし、また必要でもない。ブロック構造物を空げきが等方的に配列しているものとして取扱うか、ブロック構造物全体としての抵抗を求めるかのいずれかの方法が、もし可能であるとすれば、実際の問題処理にあたっては有利であろう。こうした考えから、次節に述べる三つのモデルにつき、実験値を整理してみた。

2. 三つのモデル

(1) 抵抗体モデル

開水路中におかれた物体に働く力を D とし、物体の上下流の諸数値を図—1、表—1のように表わすことにす

図—1 記 号



表—1 記 号

B :	水路幅
D :	物体に働く力
d :	仮想空げきや仮想柱の基準となる長さ
F :	物体の抵抗
g :	重力の加速度
h_1, h_2 :	上流および下流側の水深
h :	平均水深 ($=1/2 (h_1 + h_2)$)
Δh :	水位差 ($\equiv h_1 - h_2$)
L :	ブロック構造物の流れ方向に沿ってはかった長さ
m, n_1, n_2, n_3 :	個数を表わす文字
Q :	流量
R :	水理径 ($=\varepsilon V/S$)
S :	水路面をもふくんだ潤面積
S_B :	ブロックのみの潤面積
v_1, v_2 :	上流および下流側の平均流速 ($=Q/Bh_1$, および Q/Bh_2)
v :	Q/Bh
V :	ブロック構造物の占める体積 ($=LBh$)
w_0 :	水の単位体積重量
ε :	空げき率

* 正会員 中央大学助教授 理工学部

ると、運動量の関係から、

$$D = \frac{w_0}{g} B \left[(h_2 v_2^2 - h_1 v_1^2) - \frac{g}{2} (h_1^2 - h_2^2) \right] \dots (1)$$

が得られる。ただし、底面勾配は 0 に近く、重力の流れ方向の成分は無視できると考えている。連続の式から

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = \frac{Q}{B} \dots (2)$$

である。したがって

$$F = \frac{w_0}{g} B d h \{ g h - v_1 v_2 \} \dots (3)$$

が物体の抵抗である。

つぎにブロック構造物の特性によってこの F を書き表わすことを考える。高さ h 、幅 B 、流れ方向の長さ L の体積中に、高さ h 、単位幅 d の小角柱が m 個ふくまれていると仮定する。1 個の角柱の体積は $d^2 h$ であるから、全角柱の体積は $m d^2 h$ で、これは、全体積から空げき体積を差し引いたものにひとしいと考えると、

$$m d^2 h = L B h (1 - \varepsilon) \dots (4)$$

となる。また角柱一個の表面積は $2 d^2$ を省略すると、 $4 d h$ であるから、全体としては、

$$4 m d h = S_B \dots (5)$$

となる。ここに用いられている ε 、 S_B は、現実のブロック構造物について測定することにより与えられる。

m 個の角柱は、流れと直角な方向には n_1 個、流れにそって n_2 個あって、 $m = n_1 \times n_2$ の関係が成立する。しかも、この配列は平面的には等方的であって、 $n_1 : n_2 = B : L$ の関係が成立すると想定すると、

$$\left. \begin{aligned} d &= 4 \frac{B h L}{S_B} (1 - \varepsilon) \\ m &= \frac{S_B^2}{16 B h^2 L (1 - \varepsilon)} \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

という関係が得られる。

一個の小角柱による抵抗 F_S が、定数 C_D をつかって

$$F_S = C_D \cdot \frac{w_0 v_1^2}{2 g} \cdot d h \dots (7)$$

のように書けるとすると、 m 個の小角柱によっては、

$$m F_S = C_D \frac{w_0 v_1^2}{2 g} m d h = C_D \frac{w_0 v_1^2}{8 g} S_B = F \dots (8)$$

となるはずである。しかし、 m 個の角柱は流れの中に孤立して存在しているのではなく、互いに影響をおよぼしあっているから、 m 個の角柱による抵抗は、実際には式 (7) の m 倍にはならず、個数 m の関数倍となるに違いない。したがって、式 (8) は

$$F = \frac{w_0 v_1^2}{g} f_1 (S_B) \dots (9)$$

のように表現されるものとなろう。式 (9) の表現では、 $C_D/8$ は f_1 の中にふくめて表現してある。式 (3) と式 (9) とから

$$f_1 (S_B) = \frac{B d h \{ g h - v_1 v_2 \}}{v_1^2} \dots (10)$$

である。 $f_1 (S_B)$ がどのような形をとるかを実験値によってきめればよい。

(2) 管抵抗モデル

ブロック構造物内に、 n 個の口径 d なる正方形断面を有するパイプがならんでおり、上下流の水頭差は、この仮想パイプを通過して流下する際に生じた摩擦抵抗に起因するものであると仮定する。

ブロック構造物の空げき体積は仮想パイプの総体積にひとしく、ブロックの潤面積は仮想パイプの総潤面積にひとしいとおくと、

$$\left. \begin{aligned} n d^2 L &= \varepsilon B L h \\ 4 n d L &= S \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

である。これから、

$$\left. \begin{aligned} d &= \frac{4 \varepsilon B L h}{S} = 4 R \\ n &= \frac{S}{16 R L} \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

となる。パイプによる損失水頭 h_f が、仮想パイプ内の平均流速 $v_{p1} = Q/n d^2 = Q/\varepsilon B h$ と定数 f_2 とをつかって、

$$h_f = f_2 \frac{L}{d} \frac{v_{p1}^2}{2 g} = f_2 \frac{L}{4 R} \frac{1}{2 g} \frac{Q^2}{\varepsilon^2 B^2 h^2} \dots (13)$$

と表わされるとする。したがって、

$$f_2 = \frac{2 g d h + (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{L}{4 R} \cdot \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot v^2} \dots (14)$$

となるが、一般に f_2 はレイノルズ数または R の関数として表わされよう。

(3) 急拡張パイプ モデル

ブロック構造物の内部は、急拡張をくり返すパイプの連続体になっていると想定する。一対の急拡張部を通過することによる水頭の損失は、 $f v^2/2 g$ の形で書かれるであろう。ブロック内部の空げきは、このような急拡張部の連続したものに置換えられる。いま、空げきの配列は、流れに沿った方向、直角な方向、鉛直方向に関して、等しい間隔でならんでいるものとする。この三方向に沿って存在する空げきの個数をそれぞれ n_1 、 n_2 、 n_3 とし、全体の個数を m とすると、

$$\left. \begin{aligned} m &= n_1 \times n_2 \times n_3 \\ n_1 : n_2 : n_3 &= L : B : h \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

である。1 個の空げきの形を立方形であると考え、その一边を d とすると、全空げき体積について、

$$m d^3 = \varepsilon V \dots (16)$$

が成立し、全空げき表面積については、

$$6 m d^2 = S \dots (17)$$

となる。式 (15)、(16)、(17) から、

$$\left. \begin{aligned} d &= 6 \frac{\varepsilon V}{S} = 6 R, \quad n_1 = \varepsilon^{1/3} \frac{L}{6 R} \\ n_2 &= \varepsilon^{1/3} \frac{B}{6 R}, \quad n_3 = \varepsilon^{1/3} \frac{h}{6 R} \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

である。流れに直角な断面には、 $(n_2 \times n_3)$ 個の空げき

があり、その総断面積は、 $(n_2 \times n_3) \times d^2 = \varepsilon^{2/3} B h$ であるので、ブロック内部の平均流速 v_{p2} は、

$$v_{p2} = \frac{Q}{\varepsilon^{2/3} B h}$$

であたえられる。一對の急拡縮部を通過することによる水頭損失は、

$$f_3 \frac{v_{p2}^2}{2g} = f_3 \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{\varepsilon^{4/3} B^2 h^2}$$

であり、流れ方向には n_1 対の急拡縮部があるから、全水頭損失は、

$$\begin{aligned} n_1 f_3 \frac{v_{p2}^2}{2g} &= \frac{\varepsilon^{1/3} L}{6R} f_3 \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{\varepsilon^{4/3} B^2 h^2} \\ &= f_3 \frac{L}{6R\varepsilon} \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{B^2 h^2} \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

となるはずである。損失係数 f_3 は、

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{\frac{dh}{2g} + \frac{1}{2g}(v_1^2 - v_2^2)}{\frac{L}{R} \frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{B^2 h^2}} = \frac{2g \frac{dh}{2g} + (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{L}{R} \frac{1}{\varepsilon} v^2} \\ &\dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

のようになるが、一般に f_3 は、 R/L やレイノルズ数の関数となるであろう。

3. 実験結果

実験は中央大学理工学部の長さ 12 m、幅 0.7 m、深さ 0.3 m の傾斜水路で行なわれた。使用したブロックは六脚ブロックで、平均重量はでき上がった模型で測定して、1,046, 692, 400, 184 g の 4 種類であった。これらを 2 層の標準的な積み方でならべ、ブロックの上下流で生ずる落差、上下流の水深を測定した。流量は、水路末端に三角ぜきをおいて測定し、平均流速を求めるのに使用した。

図-2 は、抵抗係を仮定して得られた式 (10) の関係を示したものである。右辺に含まれる幅 B は、この実験を通じて一定であるので省略した。この結果から、六脚ブロックのこの積み方の場合には、 $f_1(S_B)$ は S_B^2 に

図-2 抵抗係モデル

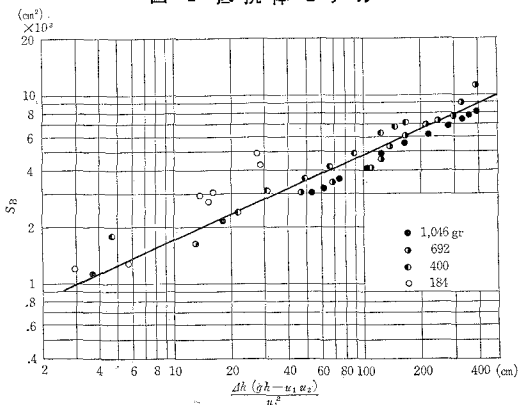


図-3 (a) 管抵抗モデル

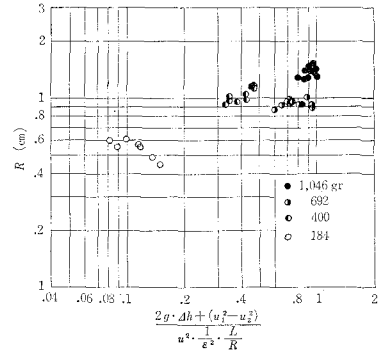


図-3 (b) 管抵抗モデル

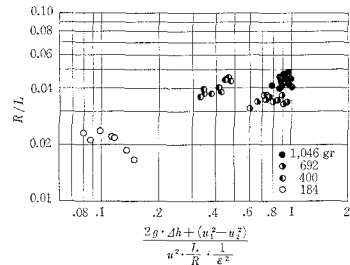
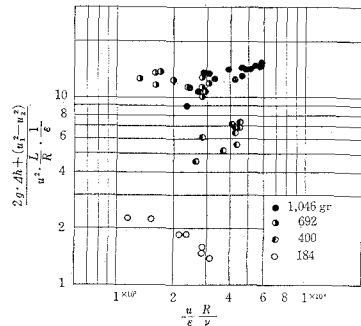


図-3 (c) 管抵抗モデル



比例すると考えてよいであろう。重量が 200 g のブロックは、他の大きさのものにくらべ、若干異なった傾向を示すようである。

図-3(a),(b),(c) は、管抵抗モデルで、式 (14) の関係から、 f_2 をそれぞれ R , R/L , レイノルズ数の関数として表示しようと試みたものである。 L の大きさは、最大のもので 31 cm、最小のもので 26 cm, R の大きさは、最大が 1.6 cm, 最小が 0.4 cm 程度であった。

図-4 (a), (b), (c) は、急拡縮パイプモデルで、式 (20) の関係から、 f_3 を R , R/L , レイノルズ数の関数として表わそうとしたものである。

管抵抗モデルと急拡縮パイプモデルとは、式 (14), (19) 両式を比較してもわかるとおり、空けき率 ε の効き方が若干異なるだけである。 ε は大きくは変化しないので、図-3 と図-4 とでは、あまり違う結果は出てこない。

図-4 (a) 急拡縮パイプモデル

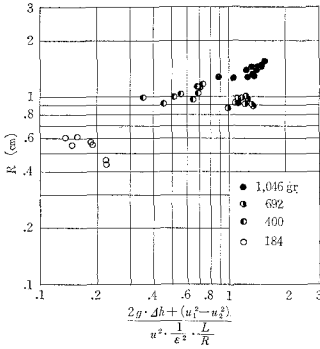


図-4 (b) 急拡縮パイプモデル

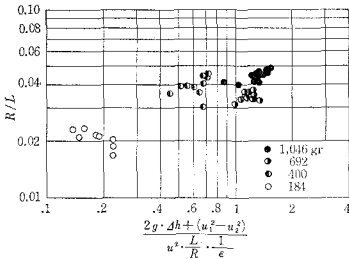


図-4 (c) 急拡縮パイプモデル

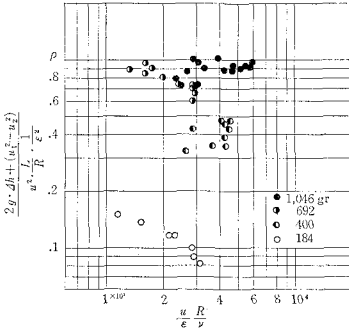


図-2, 3, 4 を通じてみると、六脚ブロックのこの積み方の場合には、抵抗体モデルが他のモデルにくらべてより適当な表現であるとしてよい。また、どの表わし方によるにしても、200 g 重量のブロックは、他のものとは異なった特性を示しているようにおもわれる。 $uR/\varepsilon\nu$ といった形でのレイノルズ数の表現によるかぎり、200 g 程度のブロックとこれより大きなものとの間には、レイノルズ数の大きな差はない。したがって、このような定義のレイノルズ数は、ブロックの大きさの差による水理的特性の差を表わすには適当ではないのかもしれない

が、200 g 重のものに対する f_2, f_3 の値が他のものにくらべて大きく異なっていることが注目される。小さなブロックを使った実験では、ブロック間を流れる水流の状況が他のものとは異なっている可能性がある。また、小さなブロックの方が、積み方やブロック間のかみ合わせ効果などに実験者による個人誤差や、実験例ごとの誤差が出やすく、さらに、空げき率の測定などにも誤差が出やすい。このような原因によって、200 g の測定値が他のものと異なった結果となったのであろう。

4. 結 語

以上のことから、つぎのような事がらが結論される。

(1) ブロックの種類によっては異なるモデルを使用するほうがその特性を表示するのに便利ことがある。

六脚ブロックに関しては、抵抗体モデルの方が他よりも適当な表現方法である。

(2) 実験に用いるブロックがあまり小さくなると、実験誤差の点でも、また水理的条件の点でも、望ましくないことがある。六脚ブロックの場合には、500 g 以上の模型を使用して実験を行なうのがよい。

(3) 抵抗体モデルを使用するにしても、ブロックの積み方によっては、 $f_1(S_B)$ の形が変わる可能性がある。積み方を変えるごとに $f_1(S_B)$ の形を確かめる必要がある。

〔付記〕 この実験は、当時中央大学理工学部学生であった呉肇樑、佐藤裕美、西山哲郎、升本喜一の諸君の協力を得て行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) Le Méhauté, B. : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, No. 6, 1957 et No. 2, 1958.
- 2) Lean, G.H. : A simplified theory of permeable wave absorbers, J. Hydraulic Res., No. 1, 5, 1967.
- 3) Scheidegger, A.E. : The physics of flow through porous media, Univ. Toronto Press, 1957.
- 4) 尾崎 晃・沢村寿男・新井泰澄 : 捨石構造における空隙の効果に関する基礎的研究 (II), 第 23 回年次学術講演会, 1968, など.
- 5) 室田 明・佐藤邦男 : 地下水流の抵抗法則に関する基礎的研究, 第 21 回年次学術講演会, 昭 41, など.
- 6) 宮永正昭・坂本忠彦 : 礫の透水性について, 第 23 回年次学術講演会, 昭 43.
- 7) 宮永正昭・首藤伸夫・橋本 宏 : 消波ブロックの水理的特性, 第 14 回海岸工学講演会講演集, 1967.
- 8) 土屋昭彦・田畑茂晴 : コンクリート ブロックの流体抵抗について, 第 22 回年次学術講演会, 昭 42.