

河床人工ブロックに作用する流体力と抵抗に関する実験的考察

Fluid dynamic forces at man-made blocks in river bed and its surface resistances

東京理科大学 理工学部 大西 外明 Sotoaki ONISHI

卜部 周一 Shyuichi URABE

Drag and lift forces acting at man-made blocks used in river bed and their surface resistances are studied experimentally. The results give relation between the surface resistance and placement way for each block. Regarding to the drag and lift, the values acting at single block differ from those at blocks composing the river bed. The study indicates effect of the blocks adjacent to the specific block substantially.

Keywords : drag, lift, resistances, river bed, man-made block

1. 緒言

近年、河道の底面や側面の根固工やのり覆工に人工ブロックを用いる事が多くなっている。しかし、その水理特性については、十分に解明されていないと考えられる。例えば、相当粗度率とブロック配置間隔の関係を知る事の必要性は、現場において強く指摘されているにも拘らず、それを明確にした研究は少なく、検討の余地を多く含むとみられる図表等¹⁾に頼っているのが現状である。また、河床の安定性検討上で不可欠な抗力・揚力についても、ブロック単体としての値だけではなく、複数のものの集合として値が実用面では必要であるにも拘らず、それについては、藤田らの報告²⁾があるものの、十分に検討されていないのが現状と考えられる。

以上の見地から、本研究は、実用に供されている形状の河床ブロックの中から幾つかのものを選んで、その水理特性を実験的に検討し、実用上で有用な資料を提供しようとするものである。

2. 実験装置と実験方法

実験に際しては実物の約1/20程度を縮尺して模型ブロックを作成し、フルード相似則によって実験条件を設定した。本実験に用いたTYPE1～4の4種類の人工ブロック模型と粗度要素の形状寸法を図1(a)～(d)に示す。実験を、二次元可変勾配開水路で行なうと、等流状態を設定するために水路長さを長くする必要があり、また等流状態を設定すること自体が一般に困難である。そこで、本研究では、摩擦抵抗係数の測定精度を高め、かつ、実験の効率化を計る為に、長さ2m、高さ48cm、幅25cmの長方形断面をもつ閉水路実験装置(図-2)を作成し、レイノルズ数が $10^2 \sim 10^3$ のオーダのレイノルズ数を持つ流れの中での、(イ)河床人工ブロックの配置状態が河床抵抗に及ぼす影響、および、(ロ)流れが河床工内の任意位置におけるブロックに及ぼす流体力を測定した。

2-1. 河床人工ブロックの配置が河床抵抗に及ぼす影響の検討

A. 模型粗度と配置: 実験閉水路(図-2)の内部の両側面をベニヤ板で覆い、ベニヤ板の内面に模型ブロックを張り付けた。ブロックの配置については、水路側面全体にブロックを敷き詰めた図3(a)～(c)に示す様な配置状態を基準とし、それから逐次、各行のブロックあるいは粗度要素を間引いていって場合(例えばTYPE1の場合、配置1-(1)～1-(4)と名附ける(図-4参照))について検討を行った。

B. 測定項目と方法: 上記の様な各々の場合について、粗度要素の配置間隔と乱流領域におけるレイノルズ数 $Re = U_m R / \nu$ (U_m = 平均流速、 ν = 動粘性係数、 R = 動水半径)と摩擦抵抗係数(f')、粗度係数(n)、相当粗度率(α : 粗度高さ k と相当粗度 K_s の比 $= K_s / k$)、および粗度面積率(β)との関係を求めた。なお、粗度面積率 β は、{流れ方向への一粗度要素の投影面積(F)} / {一粗度要素が受け持つ平面積(S)} である(図5参照)。

いま、区間長 L の間での摩擦抵抗損失水頭を Δh 、平均流速を U_m 、動水半径を R 、重力の加速度を g とすると、その水路の摩擦抵抗係数 f' 及び粗度係数 n は

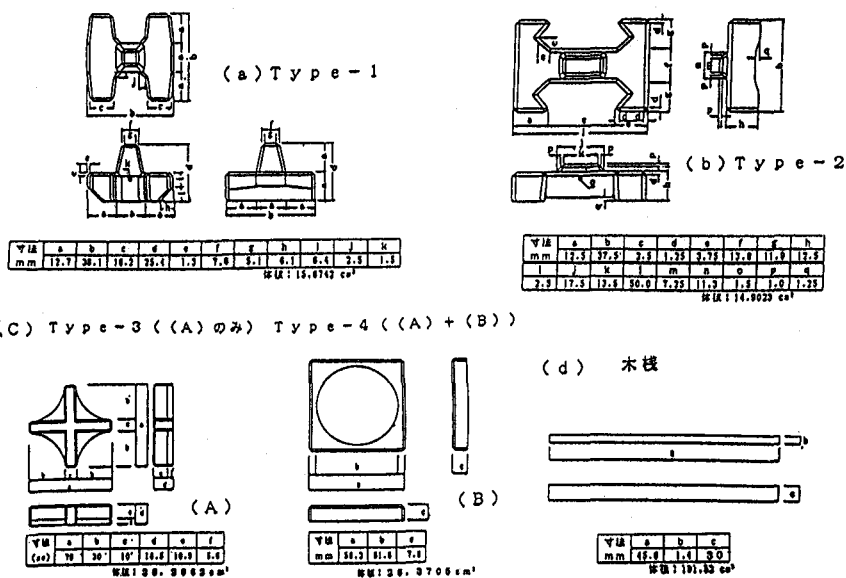


図-1 模型ブロックの形状、寸法

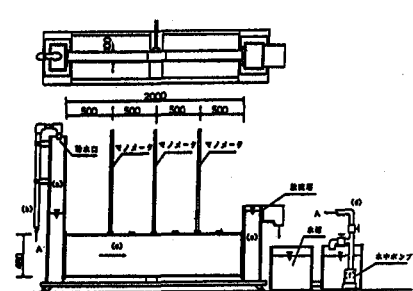


図-2 実験装置

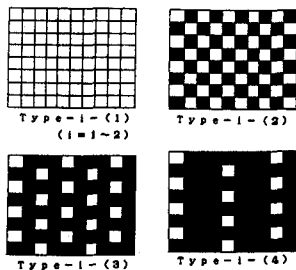


図-4

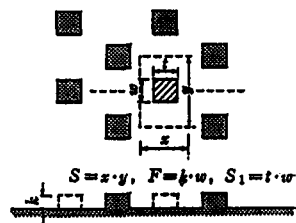
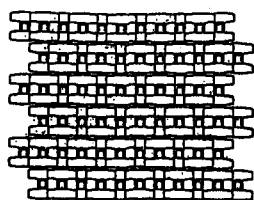
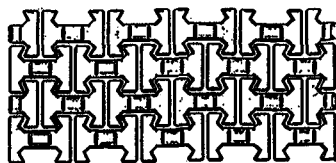


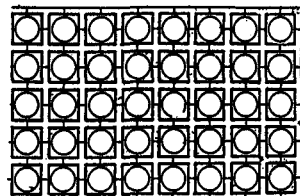
図-5



(a) Type-1 ブロック



(b) Type-2 ブロック



(c) Type-3, 4 ブロック

図-3 ブロックの配置

$$f' = \Delta h / (L/R) U_m^2 / 2g \quad \text{-----(1)}$$

$$n = (f' R^{1/3} / 2g)^{1/2} \quad \text{-----(2)}$$

また、一様径 k' の粗度をもつ動水半径 R の管内流における摩擦抵抗係数 f_0' は次式で表される。

$$1/f_0'^{1/2} = 4.06 \text{ LOG}_{10}(R/K') + 4.70 \text{ -----(3)}$$

人工ブロックの相当粗度 K_s は、 Δh の測定値と(1)式から求まる f' を、(3)式の f_0' に代入して得られる K' を K_s とした次式から算定する。

$$K_s = R/10^{1/4.06(1/f' - 4.70)} \text{ -----(4)}$$

とする。

C. 実験条件

各ブロックを各配置状態における流水断面積 A と動水半径 R は以下の通りである。

表1 実験条件（流水断面積 A と動水半径 R ）

TYPE1					TYPE2			
配置	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4
A(cm ²)	208.72	255.92	279.51	297.21	233.63	268.37	285.74	298.77
R(cm)	1.71	2.16	2.38	2.53	1.95	2.27	2.43	2.54
		TYPE3		TYPE4		栈粗度		
配置	3-1	4-1	ヒッチ (cm)		3	6	12	24
A(cm ²)	255.41	82.58	A(cm ²)		62.94	27.24	343.2	350.95
R(cm)	2.17	1.48	R(cm)		2.63	2.90	3.03	3.10

また、流量を各ケースにおいて0.3～8リットル/秒の間で変化させ、何れの場合も摩擦抵抗損失水頭 Δh の測定区間長さ L を1mとした。なお、各ブロックの粗度高さ k には、図1を参照して、TYPE1では $d=2.54\text{cm}$ 、TYPE2では $h+i=1.54\text{cm}$ 、TYPE3とTYPE4では $d=1.65\text{cm}$ 、木栈では $c=3\text{cm}$ を用いた。

2-2. 流れが河床ブロックに及ぼす流体力

A. 模型粗度と配置: 河床の粗度要素の配置が、特定の粗度要素の安定性に及ぼす影響を知る為に、TYPE1の模型ブロックを流れの中に単体として置いた場合の流体力と、密に敷き詰めた配置1-(1)(図3)の場合につき、図6に示す特定ブロックPの上流部のブロック配置長さ L を色々に変化させて、ブロックPに働く流体力を測定した。

B. 測定方法: 図7に示す様な鋼板製のT型架台に水中歪ゲージを取り付け、弾性梁の歪から抗力と揚力を算定した。その際、歪ゲージは架台梁部の前面と後面に張り付けて、各々の歪を別々に測定した。図8は計測システムの概略図である。図7において、抗力 F_D （模型ブロックの幾何学的中心に作用するものとする）の作用線と歪ゲージの中心との距離を η とすると、抗力 F_D により歪ゲージの位置に生じるモーメント M は、梁部に作用する流体力は無視すと、次式で表される。

$$M = F_D \eta \text{ -----(5)}$$

ただし、 η は歪ゲージの中心とブロックの重心との間の鉛直距離である。梁鋼板の幅と厚さを b 、 h とすると、梁部の断面二次モーメント I は $bh^3/12$ であるから、モーメント M により梁鋼板上の歪ゲージ部分に生じる応力 σ_M は、次式で表される。

$$\sigma_M = M(h/2)/I = 6M/bh^2 \text{ -----(6)}$$

鋼板の弾性係数を E 、曲げモーメントによる歪ゲージの歪量を ε_b とすると、 $\sigma_M = E\varepsilon_b$ であるから、(5)、(6)より抗力 F_D は

$$F_D = E b h^2 \varepsilon_b / 6 \eta \text{ -----(7)}$$

揚力 F_L により梁鋼板に生じる応力 σ_N は、揚力 F_L による歪ゲージの歪量を ε_n とすると、

$$\sigma_N = F_L / bh = E \varepsilon_n \text{ -----(8)}$$

したがって

$$F_L = b h E \varepsilon_n \quad \text{-----} \quad (9)$$

いま、架台梁部の前面と後面に張り付けた歪ゲージから測定される歪を ε_1 、 ε_2 とすると、近似的に次の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n + \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_n - \varepsilon_b$$

したがって

$$\varepsilon_b = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \quad \text{-----} \quad (10)$$

$$\varepsilon_n = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 \quad \text{-----} \quad (11)$$

(7)と(8)から抗力係数 C_D と揚力係数 C_L は、次式となる。

$$C_D = 2 F_D / \rho A_D U_m^2 = (E b h^2 \varepsilon_b / 3 \eta) / \rho A U_m^2 \quad \text{-----} \quad (12)$$

$$C_L = 2 F_L / \rho A_L U_m^2 = (2 b h E \varepsilon_n) / \rho A U_m^2 \quad \text{-----} \quad (13)$$

ここに、 ρ = 水の密度、 U_m = 平均流速、 A_D = 流れ方向へのブロック単体の投影面積、 A_L = 流れ方向と垂直方向へのブロック単体の投影面積である。

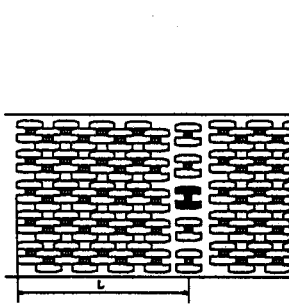


図-6

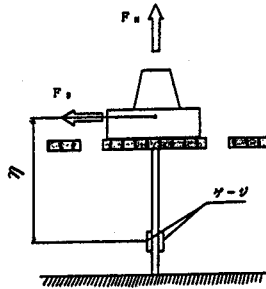


図-7

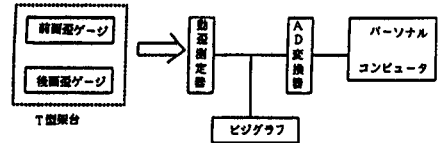


図-8 計測システム概略図

3. 実験結果

3-1. 摩擦抵抗係数、相当粗度率 α 、および、粗度面積率 β

2-1節に記した各実験条件下で得られた、レイノルズ数 Re と摩擦抵抗係数 f' の関係を図9(a)～(d)に示す。ただし、

$$R_o = U_m R / \nu \quad : \nu = \text{動粘性係数} \quad \text{-----} \quad (14)$$

これらの図から、いずれのブロックの場合にも、レイノルズ数が約400より大きい領域においては、 f' がほぼ一定となる事が分かる。この完全乱流域における f' の平均値を(4)に代入して K_s を算定し、さらに、その K_s 値に対する相当粗度率 α を求めた。図10に相当粗度率 α と粗度面積率 $\beta = F/S$ との関係を図示した。なお、図には半球型、球型、および棧型の様な基礎的な形状の粗度に関する既往の結果も併記してある。粗度面積率が減少するに連れて、模型ブロック固定板（本実験ではベニヤ板）の粗度の影響が現れるが、粗度面積率がある程度大きい領域では、固定板の影響は消滅する。本実験で検討対象とした木棧粗度の相当粗度率は、既往の実験値と異なっているが、それは粗度要素の幾何学的形状特性の差によるものと推論される。TYPE-1とTYPE-2のブロックの相当粗度率は、球形と半球形の粗度要素についての既往実験値のほぼ中間に分布することが図10から分かる。

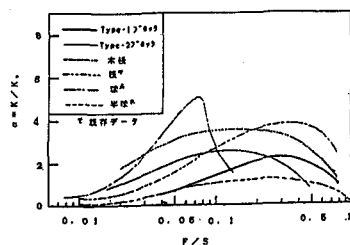
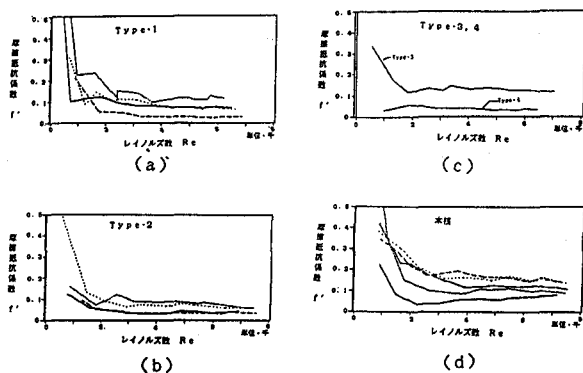


図-9 レイノルズ数 Re と摩擦抵抗係数 f' の関係 図-10 相当粗度率とブロック配置間隔の関係

3-2. 流れが河床ブロックに及ぼす流体力

ブロック単体を一個だけを流れの中に固定した時、および、ブロックPの上流部のブロック配置長さ L (図6) を0～14cmの範囲に色々に変化させた時の歪 ϵ_1 と ϵ_2 を測定し、(7)式、(9)式、(10)式、(11)式により抗力 F_D と揚力 F_L を求め、また、(12)と(13)式よりブロックPに働く流体力の抗力係数 C_D と揚力係数 C_L を算定した。ただし、TYPE-1の模型ブロックの流れ方向と、それと垂直方向への投影面積は、それぞれ $A_D=5.74\text{cm}^2$ 、 $A_L=13.07\text{cm}^2$ である。ブロックを密に敷き詰めた状態で、ブロックPに働く完全乱流領域における抗力の揚力の観測値の各々の平均を算定し、それらと(上流部ブロック配置長さ L) / (ブロック底面の辺長さ $B=3.81\text{cm}$)の比との関係を図示したのが図11である。なお、 $L/B=-2\text{cm}$ ($L/B=-0.52$)はブロック単体を流れの中に固定した場合に相当する。さらに表2に抗力と揚力の観測値の平均値と L の関係を示す。

表2 ブロックPに働く流体力に及ぼす上流部ブロックの影響

L/B	0	1.05	2.62	3.14	3.67	(単体)
$F_D(\text{gr})$	14.22	-0.49	5.94	7.19	2.03	4.49
$F_L(\text{gr})$	7.40	7.76	8.56	8.17	6.76	9.31

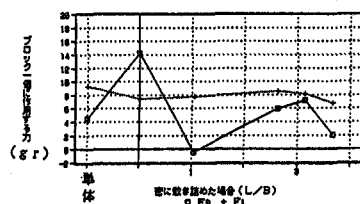


図-11 ブロックに作用する力の特性

図11と表2が示すように、揚力は L/B が小さい領域では L/B の増加につれてやや減少する傾向があるが、 $L/B>1.57$ ではほぼ一定となる。一方、抗力は、 $L/B=1.05$ (Pブロックの前方に一例配置した場合)の時には負となり、 $L/B=0$ で最大値となることが観測された。この事は河床工の上流端部では時計回りの渦が発生していること、また、それに伴う乱れにより上流端よりやや後方の点での流体力が增大することを示唆していると思われる。揚力と異なり抗力の観測値の変動は大きい、その変動の度合は L/B が増すに連れて少なくなる。以上の事は、河床工の破損は先ずその上流端付近で始まる事と符合している。

次に、レイノルズ数 Re と、(12)と(13)式より定義される抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の関係を $L/B=0, 1.05, 1.57, 2.10, 2.62, 3.14, 3.67$ の場合について図示したのが図12(a)～(h)である。なお、この場合の(12)式中の動水半径 R は1.099cmである。図から $Re>3000$ では C_D 、 C_L はほぼ一定となる事が分かる。 L/B の大きさがブロックPに働く流体力に及ぼす影響を見やすくするために、各実験条件下での最大レイノルズ数の時の抗力係数と揚力係数を表示したのが表3である。

表3 L/BがブロックPに働く流体力に及ぼす影響

L/B	0	1.05	2.62	3.14	3.67	(単体)
C_D	0.39	0.02	0.04	0.10	0.03	0.25
C_L	0.46	0.38	0.50	0.47	0.34	0.99
Re	4526	4543	4448	4539	4541	4460

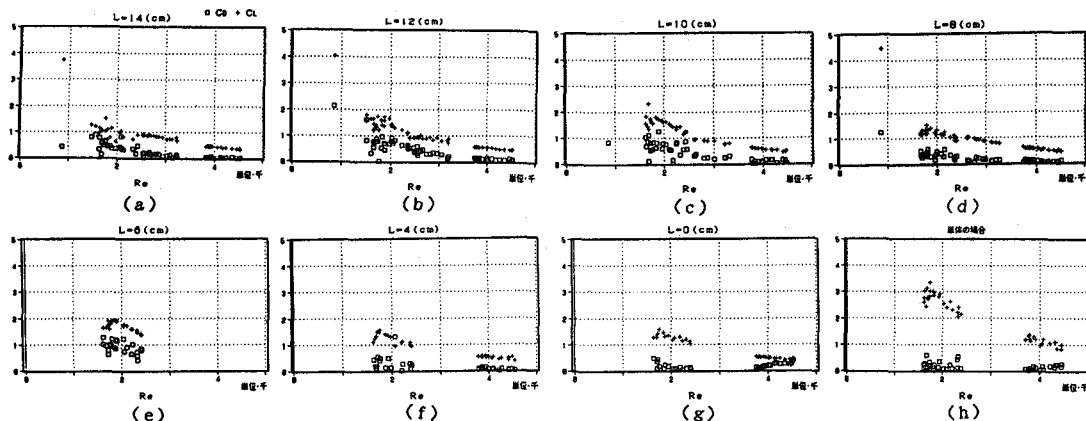


図-12 C_D , C_L と Re との関係

表3が示すように、一般に抗力係数は揚力係数に較べて小さいことから、河床工の安定に及ぼす効果は揚力の方が卓越する。また、単体ブロックと例えば $L/B=3.67$ の場合とを比較すれば分かるように、その上流部にブロックを敷設することにより C_D と C_L は共に著しく減少する。さらに、単体ブロックと $L/B=0$ （流れの横断方向にブロックが配置されているが、上流部にはブロックが無い状態）とを比較しても、単体ブロックとして揚力係数の方が大きいのが認められる。このことからわかるのは、河床工内の特定のブロックの安定性は、流れ方向に隣接する他のブロックだけではなく、横断方向のものによっても影響される事、すなわち、“特定ブロック”に働く流体力は単体ブロックに対するものよりも減少する事が分かる。ただし、前記の様に、河床工の上流端よりやや後方の点では乱れにより抗力が増大するので、河床工全体としての安定性はその部分の条件により支配されると判断される。具体的に言えば、単体ブロックの抗力係数($C_D=0.25$)の約3倍の $C_D \geq 0.75$ の値を用いて河床工の安定性を検討すべきであると考えられる。

4. 結語

実用に供されている河床ブロックの内から幾つかのものを選んで、その抵抗特性と流体力を実験的に検討した。その結果、従来明確ではなかったブロック配置間隔と相当粗度率、摩擦抵抗係数との関係を求めた。また、流れの中に固定したブロック単体に働く流体力と、河床工中の特定ブロックとに働く流体力を測定し、“河床工の破損は先ずその上流端付近で始まる”現象を定量的に説明し得た。また、河床工内の特定のブロックの安定性は、流れ方向に隣接する他のブロックだけではなく、横断方向のものによっても影響される事、河床工の上流端よりやや後方の点では乱れにより抗力が増大するので、単体ブロックについて実験的に求まるの抗力係数の約3倍程度の値を用いて河床工の安定性を検討すべきである事を指摘した。

参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集（昭和60年版），p.271
- 2) 藤田光一，福岡捷二，森田克史：護岸ブロックに作用する流体力に関する研究，第42回年講，第2部，p.324-325，1987