

礫床河川の流れの抵抗に及ぼす巨礫の影響に関する二、三の基礎的検討

Fundamental Considerations on the Influences of Large Boulders
to the Flow Resistance in Boulder-bed River

高橋 迪夫* ・ 木村 喜代治**

By Michio TAKAHASHI and Kiyoji KIMURA

In boulder-bed streams, large boulders jutting through the river bed play important roles in resistance to flow.

This paper deals with the drag force and the structure of flow around hemispherical roughness elements, which are models of large boulders. The separation length and the drag coefficient for a hemispherical roughness element were experimentally studied in the flows with various Froude number, spacings of roughnesses, or relative depth.

Keywords : flow resistance, boulder-bed river, separation length, drag coefficient

1. ま え が き

山地礫床河川は、相対水深の小さな急勾配の流れとして特徴づけられる。このような流れにおける抵抗特性には、平均的河床面から突出して点在する巨礫が大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

離散的な河床粗度上の流れを対象とした開水路流れにおける抵抗特性については、これが水工学上、最も基本的かつ重要な問題の一つであるために種々の粗度形状、寸法、間隔、配列、密度等に関して、Morris¹⁾、足立²⁾をはじめとして、従来より数多くの研究^{3)~10)}が遂行されてきた。その結果、粗度の配列あるいは密度の相違によって粗度近傍の流れの構造が異なり、抵抗等の水理特性量が変化することが指摘されている。

本報は、山地礫床河川に点在する巨礫が、その間隔、密度の相違によって流れの抵抗特性にどのような影響を及ぼすかを明らかにする基礎的研究として、巨礫のモデルとして半球粗度を用い、半球粗度の種々の間隔における粗度近傍の流れの構造の特性、および剥離長さ、抗力係数、抗力変動等の水理諸特性量が、フルード数および相対水深の変化に伴ってどのように変化するかを実験的に検討したものである。

* 正会員 日本大学助教授 工学部土木工学科
(〒963 福島県郡山市田村町徳定中河原1)

** 正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科
(〒963 福島県郡山市田村町徳定中河原1)

2. 実験装置および方法

実験に用いた開水路は、幅 $b = 22.9\text{cm}$ 、深さ 20cm 、長さ 4m のアクリライト製のものである。粗度要素は、抵抗および抗力の計測には粗度高 $k = 1.00\text{cm}$ 、また流況の可視化には $k = 1.92\text{cm}$ のプラスチック製半球が使用され、粗度中心間隔 λ で水路底面全体に千鳥状に配列された。

抗力の計測は、実験に使用したのと同じの半球粗度を張り付けた直径 2.1cm の円形シアートーブルと平行バネ構造を有する抗力計により行った。流況の可視化は、アルミ粉末およびフルオレセインナトリウム溶液を用いたトレーサー法によって行い、同時に、水路側面および上方に固定されたカメラにより、流速に応じてシャッタースピードを $1/30 \sim 1/4$ 秒の間で適宜変化させて写真撮影を行った。なお、アルミ粉末トレーサー法に対する撮影の光源としては、スライドプロジェクターからのスリット光が用いられた。また、剥離長さは、トレーサーとして過マンガン酸カリウム溶液を用いて目視観測した。

主な使用記号および粗度の配列状態が図-1に示されている。

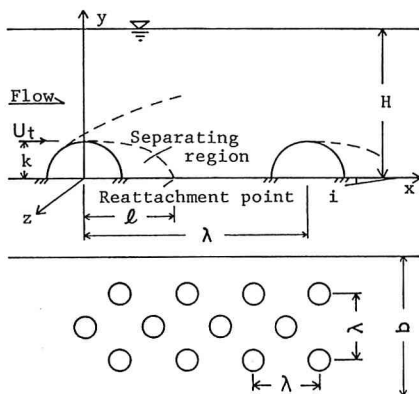


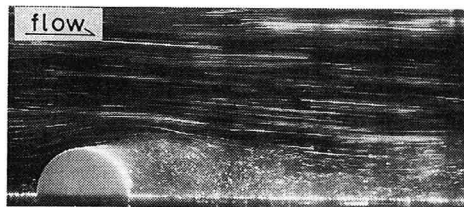
図-1 流れの模式図

3. 実験結果および考察

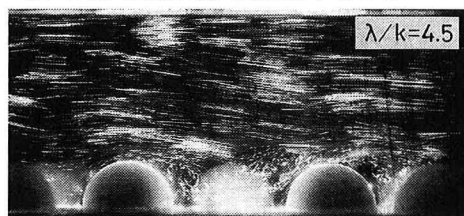
3-1 流況

写真-1は、可視化による流況観察の一例である。粗度間隔が大きい流れにおいては、粗度要素背後に形成される剥離域とその外側の混合域との境界のせん断層では、粗度頂面近傍で生成された渦（いわゆる剥離渦）が次々に発達しながら路床面方向に流下し、また、それらの渦が合体して剥離域全体が不明瞭な一つの渦領域となる流れが周期的に繰り返されている。とくに、剥離域がこの不明瞭な一つの渦領域になる状態において、混合域との混合が活発に行われ、剥離域から混合域への渦の離脱が観察される。この離脱渦の強さ、あるいは生成、離脱の周期等の挙動が、粗度近傍の流れの構造、粗度の受ける抗力さらには流れの抵抗の特性に何らかの影響を及ぼしているものと推察される。離脱が終了すると剥離域が一度掃引されて、その領域が不明瞭になる。さらにこれと前後して、混合域が路床面に到達する再付着域からはかなり明瞭な渦（いわゆる kolk-boil 渦）が水面方向に上昇していくのが認められる。粗度間隔 λ/k がほぼ $6 \sim 7$ 程度になると、流れ全体の乱流構造はより活発になり、渦の離脱周期も若干短くなっていくが、流れの構造はほぼ類似であり、それほど大きな変化は観察されない。なお、このことは、粗度間隔が 6 程度の流れにおいては個々の粗度の影響が支配的で、単一の粗度下流部の分布に類似な流れがそれぞれの粗度の下流部に形成され、

(a) $F_{rH} = 0.29$, $Re_H = 1.9 \times 10^4$, $H/k = 4$



(b) $F_{rH} = 0.13$, $Re_H = 0.88 \times 10^4$, $H/k = 4$



(c) $F_{rH} = 0.14$, $Re_H = 0.88 \times 10^4$, $H/k = 4$

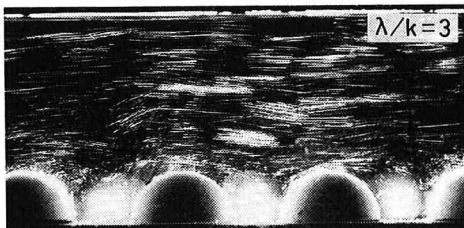


写真-1 流況例

その流れの構造の繰り返しによって粗度間の流れがほぼ特徴づけられるという、乱流特性の実験結果¹¹⁾からも確認することができる。一方、粗度間隔が4.5 程度になると、渦の生成、合体、および離脱の繰り返しの機構は、粗度間隔の大きい流れの場合とほぼ類似であるが、剥離渦が合体した後は粗度間の粗度頂面下方の領域全体が不明瞭な一つの渦領域を形成し、渦の離脱もその領域全体からなされることが見られる。また、渦の離脱方向はより上方に向かい、離脱周期も短くなってくることが観察される。さらに粗度間隔が3 程度になると、剥離域が下流側の粗度に到達し、下流側の粗度の下方 1/5~1/2 程度が遮蔽された流れとなる。この粗度間隔になると、粗度近傍の流れの構造は全体的にかなり不明瞭となるが、粗度頂面近傍で生成された渦は剥離域と混合域との境界に沿って流下し、さらに下流側の粗度を乗り越えて行くことが観察される。一方、剥離域内は動揺を繰り返しているが、混合域とはやや区分された領域を形成することが見られる。

3・2 剥離長さ

図-2, 3, 4 は、それぞれ、粗度間隔 λ/k 、フルード数 $Fr_h (= U_m / \sqrt{gH})$ 、レイノルズ数 $Re_h (= U_m H / \nu)$ に対する粗度の流下中心軸の剥離長さ l の変化を示したものである。ただし、剥離長さは、半球粗度の中心から流速の時間的な平均が0、すなわち、順流と逆流が同程度に生ずる位置までの長さとして定義されている。なお参考までに、図-3 には、瀬津・中川ら¹²⁾による開水路段落ち流れの剥離長さのデータも示されている。図-2 より、いずれの相対水深においても、剥離長さは、粗度間隔が密になるに従い減少していくことが見られる。これは、粗度間隔が密になるのに伴って粗度上方あるいは側方から粗度背後への流れ込みがより強く生じると共に、下流側の粗度要素の存在によって幾分妨げられた再付着域近傍の流れが、上流側の粗度要素背後に影響を及ぼし、その結果、剥離長さを短くしているものと推測される。また、図-3, 4 より、剥離長さは、フルード数あるいはレイノルズ数の増加と共に若干減少していく傾向を持つことが認められる。これは、フルード数あるいはレイノルズ数の増加に伴って、剥離域と混合域との境界のせん断層において生成される剥離渦がより強くなり、その結果、この剥離渦による剥離域内からの流体の連行がより強くなるためと考えられる。

なお、流況の項で述べた遮蔽高さについても、フルード数あるいはレイノルズ数等の水理量と何らかの関係があるものと推測されるが、現在までのところ、明瞭な傾向は得られていない。

3・3 流れの全抵抗に対する抗力の分担率

離散的に粗度が存在する相対水深の小さな流れの抵抗は、粗度要素の抗力と壁面の摩擦抵抗の和として取り扱うことができると考えられる⁷⁾。これより、粗度要素一個当たりの占める水路底面の面積 A_s についての全抵抗を F_r 、粗度要素一個の抗力を $\overline{F_s}$ （時間平均値）、粗度要素間の水路底面に作用する摩擦力を F_s とすれば、

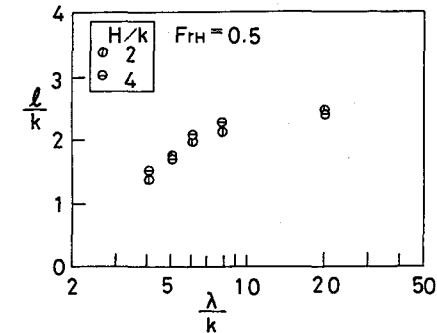


図-2 粗度間隔による剥離長さの変化

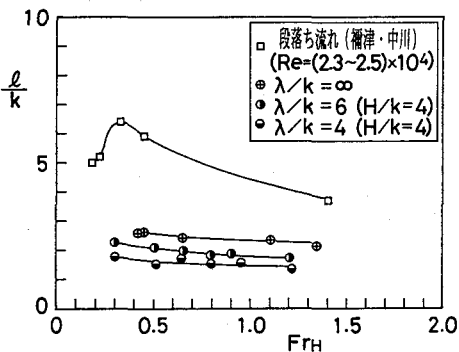


図-3 フルード数による剥離長さの変化

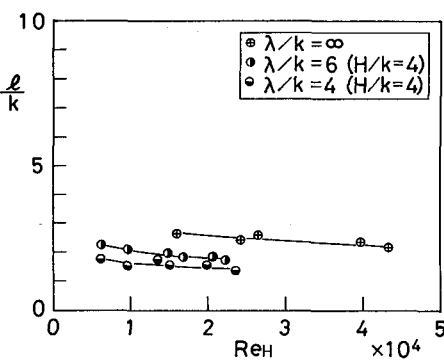


図-4 レイノルズ数による剥離長さの変化

$$F_T = \overline{F_D} + F_S \quad (1)$$

と表される。

図-5は、粗度間隔の相違による流れの全抵抗に対する抗力の分担率の変化を示したものである。ただし、抗力は抗力計によって直接計測された時間平均値を用い、また全抵抗は、 $F_T = \rho g A_B H_i$ によって算定された。図より、ややばらつきはあるが、当然のことながら、粗度間隔が密になるに伴い、全抵抗に占める抗力の割合が増大してくることがわかる。なお、 λ/k の3において、抗力の分担率が減少するのは、前述した、粗度要素の下方の一部が遮蔽されることに起因していると考えられる。

3・4 抗力係数

流れの中に置かれた物体の抗力 $\overline{F_D}$ は、一般に次式によって表される。

$$\overline{F_D} = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A_F \quad (2)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 A_F は粗度要素の流れ方向の投影面積、 U は流れの代表流速、 C_D は抗力係数である。

本報で対象としているような開水路流れにおいては、代表流速としてどの値を用いるかが一つの問題となる。断面平均流速は、平均水理量の実験結果からのみ求めることができ、算定が容易であるという利点を持っているが、物体に直接作用する流速ではない。一方、物体の頂面における流速は、多くの場合、直接計測することを必要とするために、流速を求める際に煩雑さを伴うことがあるが、物体に直接作用する流速の代表値の一つと考えることができる。本報では、粗度近傍の流れの構造の検討、あるいは粗度間隔の相違、とくに間隔の密な場合における抗力係数の特性を検討するという観点から、代表流速として、後者の粗度頂面における流速 U_t を用いて求められる抗力係数 C_{Dt} に対して検討が行われている。

図-6、7、8は、それぞれ、 C_{Dt} と、粗度間隔、相対水深 H/k 、フルード数との関係を示したものである。図-6より、粗度の下方が遮蔽を受ける λ/k が3の結果を除いては、 C_{Dt} は、ややばらつきはあるが、相対水深が4の場合にはほぼ一定の値をとることが見られる。一方、相対水深が2では、粗度間隔がほぼ6以下になると、粗度間隔の減少に伴って若干増加傾向を示すことが認められる。これは、流れがこのような条件の下においては、かなり大きな波状を呈する流れとなり、この波による影響を幾分受けているものと推測される。同様な特性は、Flammerら¹³⁾あるいは岡部ら¹⁰⁾の報告によっても指摘されている。つぎに、図-7より、 C_{Dt} は、いずれの粗度間隔においても、相対水深の増加と共に減少し、相対水深が5以上ではほぼ一定の値となることが認められる。また、図-8より、相対水深が4の流れにおいては、それほど明瞭ではないが、 C_{Dt} は、フルード数の増加に伴って緩やかに増加し、0.5~0.6でピークを示した後、再びフルード数の増加と共に幾分減少してほぼ一定値に漸近する傾向がうかがえる。このように、相対水深の小さな流れにおいて、抗力係数が、フルード数の0.5~0.6程度でピークを示すことは、Flammerら¹³⁾の結果にも見られる。

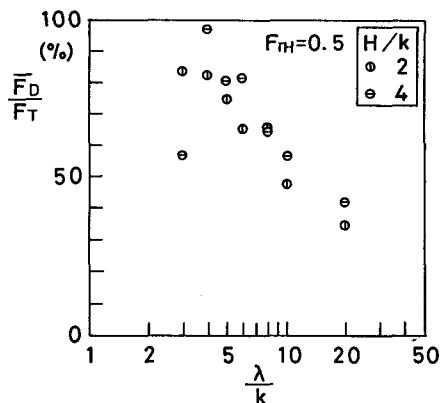


図-5 全抵抗に対する抗力の分担率

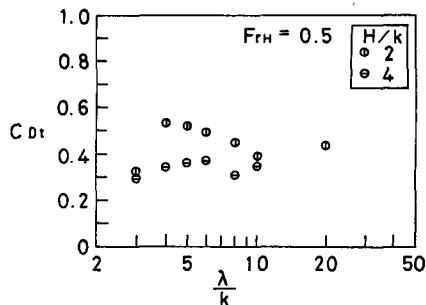


図-6 粗度間隔による抗力係数の変化

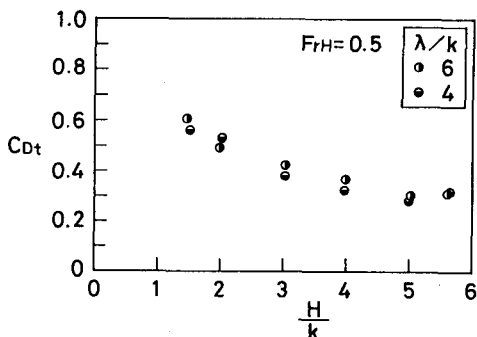


図-7 相対水深による抗力係数の変化

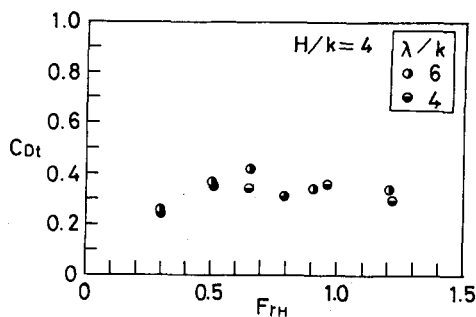


図-8 フルード数による抗力係数の変化

3・5 抗力変動係数

図-9, 10, 11は, それぞれ, 粗度間隔, 相対水深, およびフルード数の相違による抗力変動係数 C_{vD} ($= \sqrt{(F_D - \bar{F}_D)^2 / \bar{F}_D}$) の変化を示したものである。図-9より, C_{vD} は, とくに相対水深が4の流れにおいて, 粗度間隔が密になるに伴い増大する傾向を示している。この特性は, すでに粗度近傍の流況で観察されたように, 剥離渦の生成, 離脱の周期と何らかの相関があるものと推察されるが, 現在までのところ, 定量的な評価は十分になされておらず, 今後の検討課題であろう。つぎに, 図-10より, C_{vD} は, いずれの粗度間隔に対しても, 相対水深が4程度までは相対水深の増加と共に増大する傾向を示している。その後, 粗度間隔がより密な4の流れにおいては, そのまま増大傾向を示すが, 一方, 粗度間隔が6の流れにおいてはほぼ一定値となることが見られる。後者の特性は, 岡部ら¹⁰⁾の推察と一致している。また, 図-11より, 相対水深が4の流れにおいては, C_{vD} は, フルード数の相違に係わらずほぼ一定値をとることが見られる。

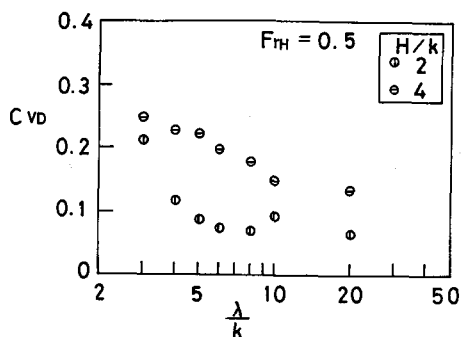


図-9 粗度間隔による抗力変動係数の変化

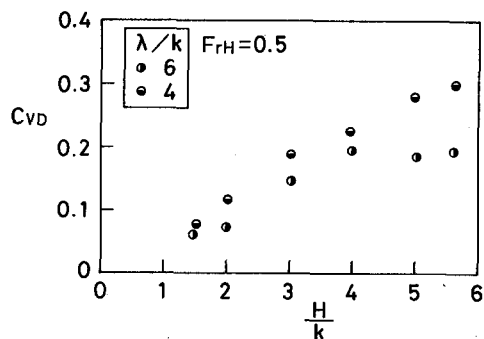


図-10 相対水深による抗力変動係数の変化

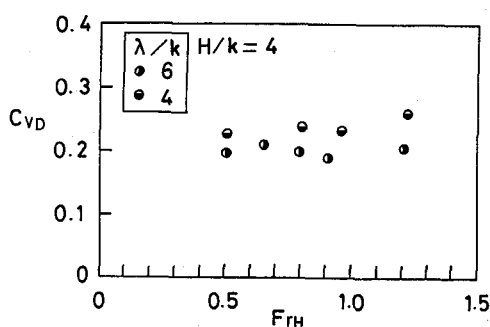


図-11 フルード数による抗力変動係数の変化

4. む す び

山地礫床河川に点在する巨礫が、その間隔、密度の相違によって流れの抵抗特性にどのような影響を及ぼすかを明らかにする基礎的検討として、半球粗度の種々の間隔における粗度近傍の流れの構造および水理特性量が、フルード数あるいは相対水深の変化に伴ってどのように変化するかを実験的に検討したが、これを要約すると次のようである。

(1) 剥離渦の生成、離脱等、粗度近傍の流れの構造が、粗度間隔と粗度高さの比が6程度を境として異なってくるのが観察された。またこの比が3程度になると、下流側の粗度の一部が遮蔽された流れとなることが見られた。

(2) 剥離長さは、粗度間隔が密になるに伴い減少していくことが見られた。また、フルード数およびレイノルズ数の増加と共に若干減少していく傾向が認められた。

(3) 流れの全抵抗に対する抗力の分担率は、粗度間隔が密になるのに伴って増大することが見られた。

(4) 抗力係数は、相対水深が2程度の場合は、粗度間隔が密になると若干増加する傾向を示した。また、相対水深の増加と共に減少し相対水深が5程度でほぼ一定値となることが認められた。

(5) 抗力変動係数は、相対水深が増加、あるいは粗度間隔が密になるに伴い、幾分増大する傾向を示した。また、相対水深が4の流れでは、フルード数の変化に対しては、ほぼ一定値をとることが見られた。

最後に、本研究を遂行するにあたり、実験、解析に尽力いただいた卒業研究生諸氏に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Morris, H. M. Jr. : Flow in rough conduits, Trans. of ASCE, Vol. 120, pp.373~398, 1955.
- 2) 足立昭平 : 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 104, pp.33~44, 1964.
- 3) 平野宗夫・岩元 賢 : 粗度の大きい流れにおける抵抗と平均流速について, 新砂防, Vol. 31, No. 3, pp.8~13, 1979.
- 4) 大同淳之・松井 弘 : 砂れき面の抵抗則, 第25回水理講演会論文集, pp.99~104, 1981.
- 5) Pyle, R. and P. Novak : Coefficient of friction in conduits with large roughness, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 19, No. 2, pp.119~140, 1981.
- 6) 中村俊六・中村勝男・田中昌治 : 3次元人工粗度の粗度特性に関する実験的研究, 第27回水理講演会論文集, pp.807~812, 1983.
- 7) 神田 徹・鈴木勝士 : 球状粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第 357号/Ⅱ-3, pp. 65~74, 1985.
- 8) 岡部健士・肥本一郎 : 粗度の大きい山地河川の抵抗則に関する研究, 新砂防, Vol. 39, No. 4, pp.4~13, 1986.
- 9) 長谷川和義 : 山地河川の形態と流れ, 水工学シリーズ, 88-A, pp.A-8-1~22, 1988.
- 10) 岡部健士・中野 晋・吉田 弘 : 粗面上に突出した球に作用する流体力, 水工学論文集, 第34巻, pp.499~504, 1990.
- 11) Kimura, K. and M. Takahashi : The experimental study on the turbulent structure of flow around large roughness elements, Proc. of 7th Cong., APD-IAHR, Vol.III, pp.163~168, 1990.
- 12) 瀬津家久・中川博次・天野邦彦・藤本和久 : 開水路段落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性, 第31回水理講演会論文集, pp.413~418, 1987.
- 13) Flammer, G. H., J. P. Tullis, and E. S. Mason : Free surface, velocity gradient flow past hemisphere, Proc. of ASCE, Vol.96, No.HY7, pp.1485~1502, 1970.