

突起高の大きい護岸ブロックに作用する 流体力と流れに関する研究

FLOW-INDUCED FORCES ACTING ON A REVETMENT BLOCK WITH LARGE
HEIGHT RELATIVE TO WATERDEPTH OF OPEN-CHANNEL FLOWS

林建二郎¹・今野政則²・浜口憲一郎³・阿部康紀³

Kenjiro HAYASHI, Masanori KONNO, Kenichirou HAMAGUCHI and Yasunori ABE

¹正会員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

²学生会員 防衛大学校理工学研究科 地球環境科学専攻 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 筑波実験場 (〒300-0042 つくば市作谷642-1)

The forces acting on a revetment block used for an element of roughness of the bed in open channel flows were measured by using a three components load cell. The ratio H_p/h_a of the water depth above the blocks H_p to the height of the revetment block h_a was 2.1. Turbulent structures of the flow above the revetment blocks were also measured by using a Laser Doppler anemometer (LDA). The friction velocities near the boundary between the top part of blocks and flow were evaluated from the Reynolds stress measured by LDA. These values are nearly equal to the values evaluated from the energy gradient of flow, but less than the values estimated from the drag forces acting on a revetment block. The ratio k_s/k_c of the equivalent roughness k_s for the block to the characteristic height k_c of the block is about 1.6.

Key Words : *Revetment block, drag force, friction velocity, Reynolds stress, equivalent roughness, Load cell, Laser Doppler anemometer,*

1. はじめに

護岸ブロックは、堤防および低水路河岸を降水や流水の浸食作用に対して保護することを目的として設置されるものである。従来の護岸ブロックの設計法は、現場の実践・経験を通して工夫されたものであり、力学的設計法となっていないため、新工種の護岸の安定性の照査がすぐにできないものであった^{1), 2)}。

そこで、平成11年2月に、(財)国土開発技術センターより「護岸の力学設計法¹⁾」が発刊され、護岸ブロックの力学設計法に関する照査が可能となっている。また、平成11年7月には、(財)土木研究センターより「護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル²⁾」が発刊され、護岸ブロックの力学設計に必要な護岸ブロック水理特性値(抗力係数、揚力係数、相当粗度等)に関する標準的な試験評価も可能となってきた^{3), 4)}。

その後、多種多様な護岸ブロックに対してこのマニュアルに則った試験法が実施され、水理特性値に関する多

くのデータが蓄積され、護岸ブロック形状による整理・分析が行われている。しかし、想定外の形状を有するブロック等に対し、このマニュアルに則った試験評価法の問題点が生じてきた。その一つとして、扇状地河川の低水河岸根固工などに見られる比較的大きな空隙を有し突起高の大きなブロックの場合(例えば、 $H/h_a=5\sim7$ 程度、 H :水深、 h_a :ブロック全体高)、相当粗度 k_s があまりにも大きな値となることが挙げられる⁵⁾。

本研究は、水深 H に対して突起高の大きなブロックにおける上記問題点の原因を明らかにし適切な評価法を提案することを目的として、六脚ブロック群中のブロック単体に作用する流体力の分力計を用いた直接計測と、ブロック群上流の流速計測を行なったものである。

2. 実験装置および方法

実験には、図-1に示す還流装置付き二次元造波水槽(長さ40m、幅0.8m、高さ1m)を用いた。水槽の一区間を20cm底上げし、長さ8.3mのステンレス板製の水平床を

作成した．辺長=3.1cmの立方体を7個組み合わせた六脚ブロックを，水平床の一区間（長さ=6.53m）に設置した．水路横断方向および水路長さ方向への設置列数は9列と85列である．ブロック一個の水路横断方向幅は8.3cm，水路流れ方向の長さは $l_b = 7.7\text{cm}$ である．ブロックの設置間隔は2mmである．水平床からブロック上端までのブロック全体高は $h_a = 8.6\text{cm}$ である（図-2 参照）．

ブロック群の上流端から下流へ4.82mの位置の水路幅中央に設置されたブロック一個に作用する流体力を，ステンレス製水路床の下部に設けた3分力計（日計電気（株）；定格容量=9.8N（1kgf））を用いて計測した．3分力計の載荷盤とブロックとの接続には接着剤を用いた（図-2(a) 参照）．ブロックに作用する流体力の流れ方向成分 F_x を抗力 D ，流れと直角上向成分 F_y を揚力 L ，流れと直角水平方向成分（=水路横断方向成分） F_z を横揚力 L_x とする．ブロック設置時の3分力計の水中での固有振動数は約25Hzであった．サンプリングの周波数および時間は，30Hz以上の60秒以上とした．

六脚ブロック群上を流れる流れの水面勾配を計測するために，ポイントゲージと容量線式波高計を用いて，水平床面と水表面の標高（=水平基準面からの高さ）をそれぞれ計測し，ブロック群上端面からの水深 H_p と水平床からの水深 H （=水表面の標高 - 水平床面の標高）を評価した．容量線式波高計計測のサンプリングの周波数および時間は，30Hz以上の120秒とした．

水平床上に一樣な高さ（ $h_a = 8.6\text{cm}$ ）で設置された本ブロック群上方部の流れは，流れ方向に水深が緩やかに減少する常流の漸変不等流である．実験条件を表-1に示す．全ての実験ケースにおいて，力計測用の六脚ブロックを設置した場所での水深は $H = 26.5\text{cm}$ に，ブロック群上端面からの水深は $H_p = 17.9\text{cm}$ に調整した．還流ポンプ用モータの回転数を調整し還流流量を変化させ力計測用ブロック上の鉛直断面平均流速 U_m を変化させた． U_m は10.4～75.8cm/sの6通りとした．フルード数 $Fr = U_m / (g H_p)^{0.5}$ およびレイノルズ数 $Re = U_m H_p / \nu$ の範囲は， $0.08 < Fr < 0.57$ ， $18600 < Re < 135000$ である．実験条件を表-1に示す．

力計測用六脚ブロック周りの流速分布計測には，自動トラバース装置付きの二成分レーザ流速計(Dantec社製)を用いた．流速測定体積部の最大寸法は1mm以下である．サンプリングの周波数および時間は，100Hz以上の60秒とした．

表-1 実験条件

$$H=26.5\text{cm}, H_p=17.9\text{cm}, h_a=8.6\text{cm}, Fr=U_m / (g H_p)^{0.5}, Re=U_m H_p / \nu$$

Case	A	B	C	D	E	F	G
$U_m(\text{cm/s})$	75.8	70.9	59.9	47.0	34.3	22.2	10.4
$l=\Delta H/\Delta x$	0.01	0.007	0.0042	0.002			
le	0.0062	0.0047	0.0032	0.0017			
Fr	0.57	0.54	0.45	0.35	0.26	0.17	0.08
Re	135700	126900	107200	84100	61400	39700	18600

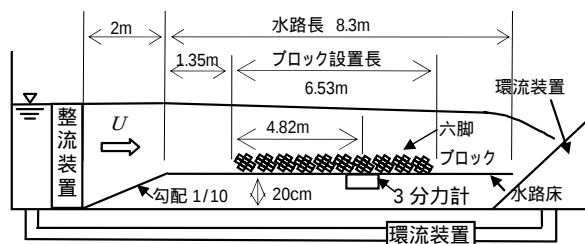
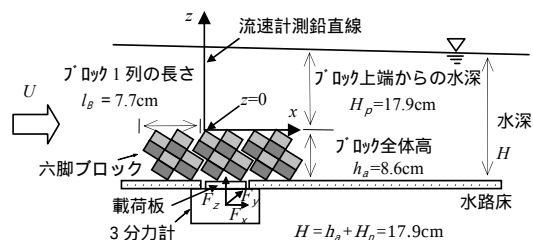
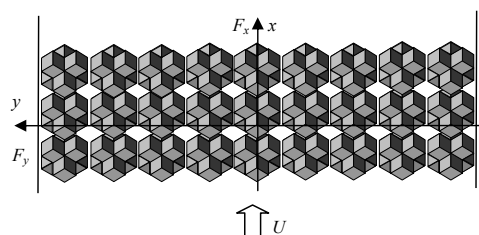


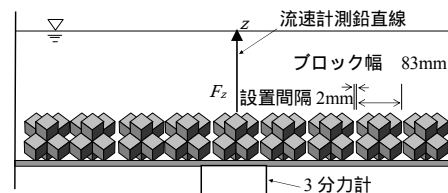
図-1 実験装置の概略図



a) 側面図



b) 平面図



c) 正面図

図-2 六脚ブロック群の設置概況図

3. 実験結果および考察

(1) ブロック群の設置特性値

辺長=3.1cmの立方体を7個組み合わせた六脚ブロック一個の体積は $208.5\text{cm}^3 (= 3.1 \times 3.1 \times 3.1 \times 7)$ ，重さは2.57N（0.263kgf）である．本ブロック1個の抗力作用面積（=流れ方向への投影面積）は $A_d = 61.2\text{cm}^2$ である．

本実験においては，このブロック765個（=9×85）を，図-1，図-2に示すように長さ6.53m，幅0.8m，高さ8.6mの直方体空間内に設置している．従って，この直方体空間内における敷設ブロック体積の占有率は $0.355 (= 208.5 \times 765 / (653 \times 80 \times 8.6))$ ，空隙率は0.645である．また，

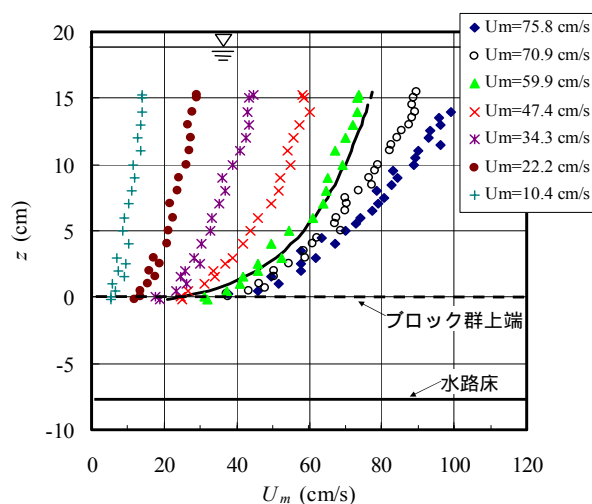


図-3 流速分布

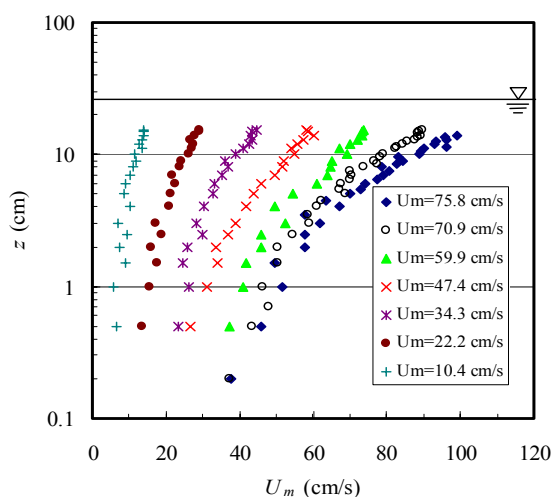


図-4 流速分布 (対数軸)

本実験においては、面積 5.224m^2 (=長さ $6.53\text{m} \times$ 幅 0.8m)の水平床に765個のブロックが設置されている。従って、ブロック1個が占める床面積を粗度要素支配面積 A_c と定義すると $A_c = 68.3\text{cm}^2$ (= $5.224\text{m}^2/765$)となる。

ブロック体積をブロックの粗度要素支配面積 A_c で除した値をブロック平均高 h_0 とし、ブロック全体高 h_a から h_0 を引いた値をブロック突起高 $h_b = h_a - h_0$ と定義する。本六脚ブロックの平均高は $h_0 = 3.05\text{cm}$ である。従って突起高は $h_b = 5.55\text{cm}$ となる。

(2) ブロック群上流の流速分布

流体力計測用の六脚ブロック単体の上流側上端点を流速計測位置の原点($x=0$, $y=0$, $z=0$)とし、その鉛直上方に z 座標軸、流れ方向に x 座標軸、横断方向に y 座標軸をとる(図-2参照)。水路流れの水平方向(x 方向)流速成分の時間平均値を U 、その乱れ成分を u' とする。水路流れの鉛直方向(z 方向)流速成分の時間平均値を V 、その乱れ成分を v' とする。 U の $z=0$ から水表面までの鉛

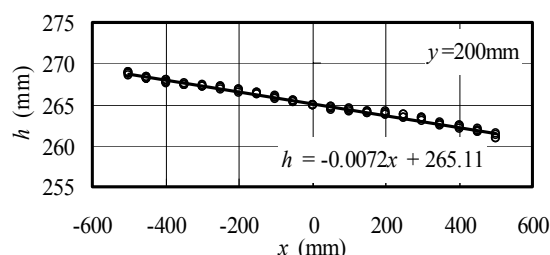
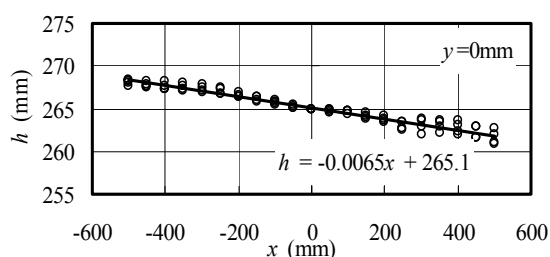
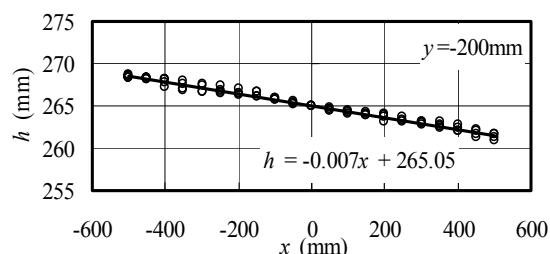
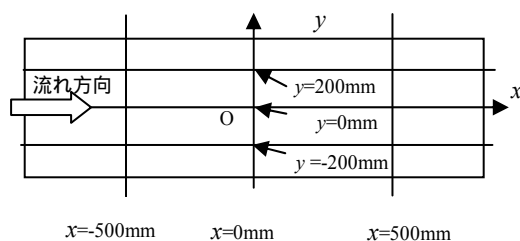


図-5 抗力測定ブロック付近の水位計測値($U_m=70.9\text{cm/s}$)

直断面平均値を U_m とする。

$x=0$, $y=0$ の位置における U の水深方向分布を各実験ケースにおける U_m をパラメータとして図-3に示す。今回用いたレーザ流速計測の制約上、水表面近傍での流速計測が困難であったため、この部分における U の値を下方の U の測定値から外挿し鉛直断面平均値 U_m を算定した。本ブロック群内においては、空隙率=0.645の空隙が存在するために、ブロック上端面($z=0$)近傍における流速は、 $U=0$ に近づかず、変曲点を有しブロック空隙内の流速に接続する。

図-3の z 軸を対数表示した結果を図-4に示す。流速の原点位置 z_0 の調整は行っていないが、ブロック群上端面近傍を除いた上方では流速 U_m の対数則領域が成立している。

(3) ブロック群上流の水面勾配

力計測用六脚ブロック設置点($x=0$, $y=0$)の前後50cm

区間での水路床から水面までの水深 h の流れ方向(x 方向)変化の一例($U_m=70.9\text{cm/s}$ の場合)を、計測線を水路横断方向に $y=-200\text{mm}$, 0mm , 200mm と変えて図-5に示す。図中に示す直線は、最小二乗法を用いた1次式近似式である。水面勾配 $I_e=dh/dx$ の水路横断方向場所 y に対する変化は小さく、力計測用の六脚ブロック設置点近傍における水面勾配は $I_e=dh/dx=0.007$ となっている。各実験ケースにおける水面勾配 I_e の実測値を、後記のエネルギー勾配 I_e と共に表-1に示す。

(4) ブロック群上部に作用する壁面せん断力

水平床である本開水路の流れは、図-5に示すように渐变不等流である。禰津⁶⁾による流下方向に水深が減少する加速流の解析手法によると、六脚ブロック上端部の位置($z=0$)に設けた仮想壁面に作用する壁面せん断力

$\tau_B(=\mu \partial U / \partial z - \rho \overline{u'v'})$, $z=0$) は(1)式で示される。但し、

この仮想壁面上($z=0$)では、流れの鉛直方向(z 方向)流速成分の時間平均値は $V=0$ と仮定する。

$$\tau_B = -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} H_p - \rho \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{H_p} U^2 dz \quad (1)$$

式中、 H_p はブロック群上端からの水深($=H-h_a$)、 h_a はブロック全体高さ、 ρ は水の密度、 μ は水の粘性係数、 g は重力加速度である(図-2(a)参照)。

ブロック上方流れの鉛直断面平均流速 U_m 、運動量補正係数 β は、(2)、(3)式で示される。

$$U_m = \frac{1}{H_p} \int_0^{H_p} U dz = q / H_p \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{U_m^2 H_p} \int_0^{H_p} U^2 dz \quad (3)$$

ここで、 q はブロック上方部流れの単位幅流量である。(2)~(3)式を用いると、(1)式は(4)式となる。

$$\tau_B = -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} H_p - \rho \frac{\partial}{\partial x} \{ \beta H_p U_m^2 \} \quad (4)$$

単位幅流量 $q(=U_m H_p)$ は一定(=定数)より $\partial q / \partial x = 0$ である。 β の流下方向(x 方向)への変化も小さい(β =一定)と仮定すると、(4)式は以下のように変形できる。

$$\tau_B = -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} H_p - \rho \frac{\partial}{\partial x} \{ \beta q U_m \}$$

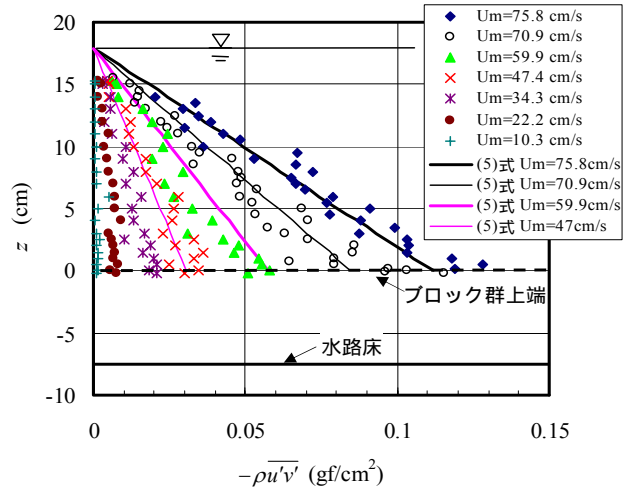


図-6 レイノルズ応力 ($-\rho \overline{u'v'}$) の分布

$$\begin{aligned} &= -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} H_p - \rho \beta q \frac{\partial}{\partial x} \{ U_m \} \\ &= -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} H_p - \frac{1}{2} \rho \beta H_p \frac{\partial U_m^2}{\partial x} \\ &= -\rho g H_p \left(\frac{dH_p}{dx} + \frac{\beta}{2g} \frac{\partial U_m^2}{\partial x} \right) \\ &= \rho g H_p I_e \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 I_e はブロック上部流れのエネルギー勾配である。単位幅流量 $q=U_m H_p$ は一定より I_e は次式で示される。

$$\begin{aligned} I_e &= - \left\{ \frac{dH_p}{dx} + \frac{\beta}{2g} \frac{\partial U_m^2}{\partial x} \right\} \\ &= - \left\{ 1 - \frac{\beta U_m^2}{g H_p} \right\} \frac{dH_p}{dx} \end{aligned} \quad (6)$$

(5) ブロック群上方部流れのせん断力分布

レーザ流速計計測より得られた $x=0$, $y=0$ におけるレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'v'}$ の水深方向分布を、 U_m をパラメータとして図-6に示す。図中に示す実線は、水面勾配($-dH_p/dx$)、鉛直断面平均流速 U_m ならびに運動量補正係数 β を(5)式に代入して求めたブロック上端部の仮想壁面上($z=0$)に作用する壁面せん断力 $\tau_B(=\mu \partial U / \partial z - \rho \overline{u'v'})$, $z=0$ と水表面での全せん断応力 $\tau=0$ を結んだ近似直線である。式中の β 値は1.10とした⁸⁾。

水深 z の位置におけるレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'v'}$ は(7)式で示される。

$$-\rho \overline{u'v'} = -\rho g \frac{\partial H_p}{\partial x} (H_p - z) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{H_p} U^2 dz \quad (7)$$

(7)式より，不等流の場合における $-\rho\overline{u'v'}$ は水深に比例して増加する三角形分布からずれることが分る．水深が流下方向に減少する場合(加速流)の $-\rho\overline{u'v'}$ は，三角形分布から外れた下に凸の分布形を示すことが明らかにされている⁶⁾．

水深が流下方向に減少する本実験の加速流れにおいては， $-\rho\overline{u'v'}$ は下に凸の分布形となる．しかし，水面勾配 I が $1/100$ 以下の漸変不等流である本実験流れの場合においては， $-\rho\overline{u'v'}$ の下に凸となるひずみ度は小さく， $-\rho\overline{u'v'}$ は水表面からの距離にほぼ比例して増加している． $z=0$ におけるレイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ の計測値は，(5)式による計算値 τ_B との一致は良好であり，エネルギー勾配 I_e *水深 H_p で規定されていることが分る．栈粗度上の流れにおいても，レイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ の粗度間での平均値は本実験結果と同様に，水表面より栈粗度近傍まで直線的に増加することが報告されている⁷⁾．

流れの全せん断応力は，レイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ と粘性によるせん断応力 $\mu dU_m/dz$ (μ ；流体の粘性係数)の和で構成される．ブロック群内に空隙が存在しないように密にブロックを設置した場合，ブロック上端面は平らな固体壁となり，固体壁上の極近傍では粘性によるせん断応力が卓越しレイノルズ応力は減少する．一方，空隙率 $\lambda=0.645$ を有する本ブロック群上でのレイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ は，ブロック上端面まで水深にほぼ比例して増加している．つまり，空隙率 $\lambda=0.645$ を有する本ブロック群上端面の仮想壁面でのせん断応力は，ブロック群の空隙内に存在する流体とその上部流体との運動量交換によるレイノルズ応力で支配されていることが分る．

(6) ブロックに作用する流体力と仮想壁面に作用するせん断力

ブロック群上端面に設けた仮想壁面 ($z=0$) に作用する流れによるせん断力を τ_B とする．仮想壁面の極近傍におけるレイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ の計測値より推定した τ_B を τ_{BR} とする．エネルギー勾配 I_e を用いた(5)式による τ_B の算定値を τ_{BRC} とする．これら τ_B の平均流速 U_m に対する変化特性を図-7に示す． τ_{BR} と τ_{BRC} の一致は良好である．

ブロック群中のブロック1個が占める床面積を粗度要素支配面積 A_c (3-(1)ブロック群の設置特性値を参照)とすると，ブロック1個に作用する抗力 F_x の単位床面積当りの大きさ τ_{BD} は(8)式で示される．

$$\tau_{BD} = F_x / A_c \quad (8)$$

τ_{BD} の U_m に対する変化特性を τ_{BR} および τ_{BRC} と一緒に図-7に示す． τ_{BD} は， τ_{BR} や τ_{BRC} より大きな値となっている．これは，ブロックには，a)レイノルズ応力の発生による仮想壁面に作用するせん断力 τ_B に起因する流体力に併せて，b)ブロック群中の流れ方向への圧力勾配に起因する

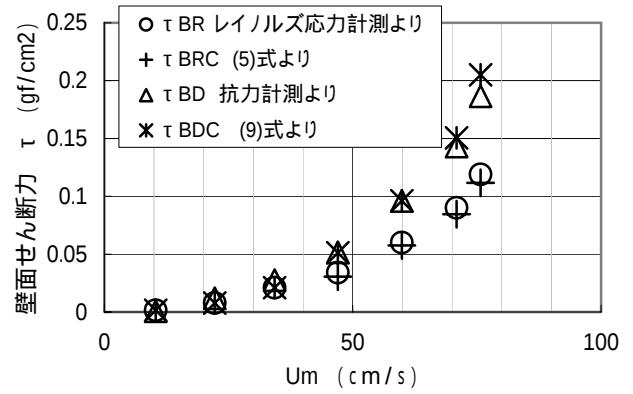


図-7 τ_B の平均流速 U_m に対する変化特性

流体力が付加する結果と考えられる．

空隙率 $\lambda=0.645$ を有する本ブロック群の空隙を通る際の空間平均的な水の流れ速度(実質流速) $U'_{B/m}$ は，ブロック群の抵抗によりブロック群上の流速 U より小さい．また，その見かけ流速の空間平均値は $U_{B/m}=\lambda U'$ であり，より小さな値となる．従って，ブロック群内の流れの運動量流束の流れ方向(x方向)変化は，ブロック群上の流れの場合に比べて小さく無視できると仮定できる．以上より，ブロックに作用する抗力 F_x の単位床面積当りの大きさ τ_{BDC} は，(9)式で示される．

$$\tau_{BDC} = \tau_{BRC} - \rho g \frac{\partial h}{\partial x} h_a \quad (9)$$

(9)式右辺の第1項 τ_{BRC} は，ブロック群上端面に設けた仮想壁面 ($z=0$) に作用する流れによるせん断力の(5)式による算定値である．この τ_{BRC} 値は，仮想壁面の極近傍におけるレイノルズ応力 $-\rho\overline{u'v'}$ の計測値 τ_{BR} と良く一致している．第2項は，ブロック群内における静水圧分布の流れ方向(x方向)変化に起因する作用流体力の換算値である． $h(=H)$ は水深である． h_a はブロック全体高さである．

ブロック1個に作用する抗力 F_x の単位床面積当りの大きさ τ_{BDC} の平均流速 U_m に対する変化特性を， τ_{BD} と一緒に図-7に示す． τ_{BDC} は τ_{BD} より若干大きくなっているが， τ_{BDC} と τ_{BD} の一致は良好である．

(7) ブロック群上方流れの流速分布と相当粗度 k_s

ブロック群上方流れにおける鉛直断面の流速分布は，対数分布則で近似できるとすると，流速 U の鉛直断面分布および断面平均流速 U_m は(10)，(11)式で示される．

$$\frac{U}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \frac{z - z_0}{k_s} \quad (10)$$

$$\frac{U_m}{u_*} = 6 + 5.75 \log_{10} \frac{H_p}{k_s} \quad (11)$$

式中の、 z_0 は流速の原点位置²⁾、 k_s は相当粗度、 u_* は摩擦速度 $\{u_* = (\tau_b / \rho)^{0.5}\}$ である。

U_m の実測値とレイノルズ応力計測による τ_{br} を用いた u_* を (10)、(11) 式に代入し、六脚ブロック群の相当粗度 k_s を算定した。平均流速 U_m に対する k_s の変化を図-8 に示す。本実験に用いた六脚ブロック群の相当粗度は k_s = 約9cm となっている。

本ブロック群の相当粗度 k_s = 約9cm は、ブロック全体高 h_d = 8.6cm とほぼ等しく、ブロックの粗度高さ (= 突起高 h_b = 5.55cm；3. (1) ブロック群の設置特性を参照) の約1.6倍となっている。栈粗度の場合、相対栈間隔 (栈粗度の間隔 / 粗度高さ) が10前後で、相当粗度は粗度高さの4 ~ 6.5倍となる結果が報告されている^{9)、10)}

最後に、一例として、 U_m = 59.9cm/s の場合における u および k_s を (10) 式に代入して得られた流速 u の鉛直断面分布を図-3 に実線で示す。式中の流速原点位置 z_0 は -1.5cm とした。ブロック上方部の流速分布は、対数分布則で近似されている。

4. おわりに

比較的大きな空隙を有し、水深に対して突起高の大きな六脚ブロックに作用する流体力計測とブロック群上流の流速計測を、流れ方向に水深が緩やかに減少する漸変不等流を用いて行った。得られた主要な結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) ブロック群上方の漸変不等流 (水面勾配 $I=0.007$) においても、ブロック群上端面近傍を除いて、流速の対数則領域が成立していることを確認した。
- 2) ブロック群上流のレイノルズ応力 $-\rho u'v'$ は、水表面よりブロック上端面までエネルギー勾配 I_e に比例して水深方向にほぼ直線的に増加することを確認した。
- 3) 水面勾配より算定したエネルギー勾配 I_e 、およびレイノルズ応力より評価したブロック群上端面での摩擦速度は、ブロック1個に作用する抗力計測より算定した摩擦速度より小さいことを明らかにした。
- 4) ブロック群中のブロック1個に作用する抗力は、a) ブロック群内・外の流体の運動量交換によるレイノルズ応力と、b) ブロック群中の静水圧の流れ方向勾配に起因する流体力との合計値と釣り合っていることを確認した。
- 5) 本六脚ブロック群の相当粗度は k_s = 約9cm であり、ブロック突起高 h_b = 5.55cm の約1.6倍であった。

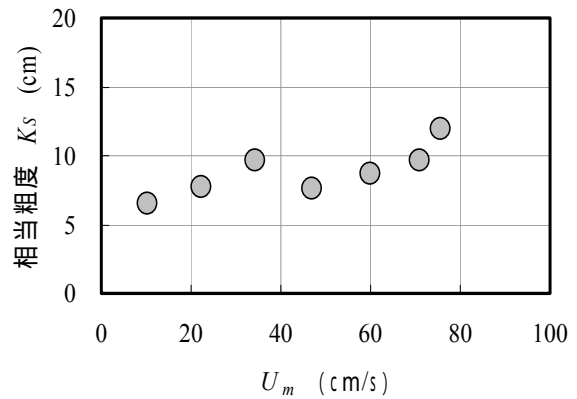


図-8 平均流速 U_m に対する k_s の変化

謝辞：本研究は、九州大学応用力学研究所平成16年度共同研究および日本大学工学部平成16・17年度文部科学省学術フロンティア事業の援助を受けた。東洋大学の福井吉孝先生より有益なご助言を頂いた。実験の実施にあたり、防衛大学校の斉藤 良学生にお世話になった。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人国土開発技術開発センタ - 編：護岸の力学設計法，山海堂，1999.2。
- 2) 護岸ブロック試験法検討委員会編：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル，財団法人土木研究センタ - ，1999.7。
- 3) 山本晃一・林建二郎・関根正人・藤田光一・田村正秀・西村晋・浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数および相当粗度の計測方法について，水工学論文集，第44巻，pp.1053 - 1058，2000。
- 4) 田村正秀・木下正暢・浜口憲一郎・阿部康紀：護岸ブロックの形状と抗力・揚力特性について，流体力の評価とその応用に関する研究論文集，第2巻，土木学会水理委員会基礎水理部会，2003.1。
- 5) 財団法人土木研究センタ - ：護岸ブロックの試験法，開発研究平成12年度報告書，2001.3。
- 6) 柳津家久・門田章宏・戸田孝史・中川博次：加速流および減速流の解析手法とその乱流特性，土木学会論文集 No.509/-30，pp.89-97，1995。
- 7) 富永晃宏：栈粗度の相対栈間隔が開水路の乱流構造に及ぼす影響，水工学論文集，第36巻，pp.163 - 168，1992。
- 8) 椿東一郎：水理学，森北出版，pp.103 - 104，1973。
- 9) 足立昭平：人工粗度の実験的検討，土木学会論文集，第104号，pp.33-44，1964。
- 10) 吉川秀夫：水理学，技報堂出版，pp.162-163，1987。

(2005.9.30受付)