

護床ブロックの洪水に対する安定条件 に関する研究

STABILITY CONDITION OF RIVER BED PROTECTION BLOCK AGAINST FLOODS

井上浩一¹・田中規夫²・八木澤順治³

Koichi INOUE, Norio TANAKA and Junji YAGISAWA

¹学生会員 学(工) 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³学生会員 修(工) 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

Wind tunnel experiment was conducted to identify the lift and drag characteristics of bed protection block and the stability of the block under flood conditions. The bed protection block was modeled and the time averaged value of the lift and drag coefficients, C_{L_ave} and C_{D_ave} , respectively, were evaluated by measuring the lift and drag force. In addition, the lift coefficients with three standard deviation remotes from time averaged value, $C_{L_3\sigma}$ and the drag coefficient corresponding to the lift, $C_{D_L3\sigma}$, were also evaluated. When C_{L_ave} and C_{D_ave} are used for the analysis, the bed protection block with 3000 kgf in weight, isn't collapsed if no gap between the block and the substrate is caused by scouring. In contrast, when $C_{L_3\sigma}$ and $C_{D_L3\sigma}$ are used for the same analysis, the block is collapsed even if there is no gap under it. This study indicates the importance to measure the time variation of the lift and drag forces and to analyze the stability of the bed protection block with large lift force condition.

Key Words : *bed protection block, lift coefficient, drag coefficient, flood event, lift coefficient of three standard deviation remotes from time averaged value*

1. はじめに

堰下流部に設置された護床ブロックについては、洪水による被災事例が多いため、その安定条件¹⁾や流体力とその変動値²⁾について多くの研究がなされてきた。しかし、平成19年9月の台風9号による出水で、多摩川宿河原堰(多摩川河口より26km付近)、荒川明戸サイフォン地点(荒川河口より83km地点)において堰上流部の連結護床ブロックが被災を受けた。連結護床ブロックが破壊されると、流水障害や偏流によって堤防を決壊させる恐れもある。そのため、大規模な出水に対しても連結護床ブロックが破壊されないよう設計・設置する必要がある。

護岸・護床ブロックの揚力・抗力特性に関する既往研究では、ブロック形状^{3)・4)}、ブロックの配置間隔⁵⁾などに着目している。一方、洪水時にブロック下に洗掘が生じると揚力が増大する場合があるため、安定条件を解明するためには洗掘の影響⁶⁾を把握することが重要である。

被災を受けた荒川、多摩川の2地点では、上流側の護床ブロックを根入れすることによって安定性を確保しようとしている。これによって、護床ブロック群の上流側ブ

ロック前面の洗掘を防止できること、また、根入れをした箇所で河床低下が生じ、護床ブロックが露出しても、流体力がブロックを根入れ面方向におさえるような流れがブロック上面に作用するため、より安定すると考えられる。しかし、大洪水や数回にわたる洪水によって深掘れ部が移動し、根入れ面上に設置された護床ブロックがむき出しになり、さらにブロック下に洗掘が生じた場合におけるブロックの安定性については不明である。

斜面上に設置された物体の抗力特性に関する研究については、海洋工学の緩傾斜堤被覆ブロックの分野(例えば、中野ら⁷⁾、太田⁸⁾など)、管路における物質輸送の分野(Laskovskiら⁹⁾)などで見られるものの、河川構造物を対象としたものは少ない。さらに、斜面に設置された物体下に洗掘が生じた場合の抗力係数・揚力係数に関する既往知見は不足している。そこで本研究では、まず風洞実験より、一般的な護床ブロックモデル(以下、BMとする)のもとで、)BM設置面の傾斜の有無、)BM下の洗掘の有無を考慮してBMの揚力係数 C_L ・抗力係数 C_D を把握する。次に、実験より得られた揚力・抗力係数を用いて、荒川明戸サイフォン地点での護床ブロックを対象とし、不安定条件を検討する。実験により得られた値は荒川明

戸サイフォン地点を再現したものではないが、斜面勾配やブロックの揚力・抗力特性の同程度なことから不安定性解析を行った。不安定とは護床ブロックの転倒に直結するものでなく、護床ブロックに流れ方向上向き回転モーメントが働くことで定義する。乱流による速度変動の時間スケールにより護床ブロックは不安定であっても転倒に至らない場合を考慮し区別したものである。既往研究の多くは、護床ブロックに作用する揚力・抗力の平均値を使用し、揚力係数・抗力係数の時間平均値(以下($C_{L,ave}$, $C_{D,ave}$))を算出している。しかし、一瞬でも護床ブロックに大きな力が作用すれば護床ブロックが不安定条件になる可能性がある。そこで、本研究では、変動値として平均値から3標準偏差離れた値を使用し、護床ブロックの不安定条件に与える影響も合わせて検討する。ここで、3標準偏差離れた値を使用するのはなるべく大きな値が発生し不安定状態になるでであると考えたからである。転倒を検討する際に1標準偏差離れた値を使用するか、3標準偏差離れた値を使用するかは今後の課題である。

2. 実験方法および解析方法

(1) 護床ブロックモデルに作用する揚力・抗力測定方法

埼玉大学水理工学研究室で保有するエッフェル型風洞(図-1(a))を用いて、測定区間上流から4mの位置に図-1に示すような護床ブロックモデル(BM)を設置し、その揚力係数・抗力係数を把握した。使用したBMを図-1(b)に示す。BMは、現地と同じ形のものが見たい。実際の護床ブロックは凹凸が多く、実験で表現するのが困難なため、今回の実験では木製の直方体ブロックを使用した。BM幅(D_w)はレイノルズ数を大きくし、風洞側面の影響を受けず横断方向の均一性を保つために5列設置することから90mmとし、BM長さ(D_L)に関しては D_w と同じ90mmに決定した。BMの高さ(D_b)によって、揚力・抗力特性は大きく変化する。そこで、BMの特性を一般的な護床ブロックの揚力・抗力特性と同等とするため、田村ら³⁾の実験結果と比較した。田村ら³⁾は護床ブロックの水理特性試験法に基づき統一的な試験方法により85種類のブロックについて揚力係数・抗力係数を測定した。図-2に、実際の護床ブロックと同様の形状のBMを1つ水路に設置し(単体実験と呼ぶ)、揚力係数・抗力係数を把握した田村ら³⁾の研究結果と本研究の比較を示す。図-2内の赤プロットは本研究における単体実験結果を示し、同程度の揚力係数・抗力係数となるようにBM高さ D_b を調整した。実験では D_b が19mm, 28mm, 38mmについて検討した。その結果、 D_b が19mmの場合に最も適合性がよいと判断し、これを本実験すべてに適用することとした。また、現地の護床ブロックのレイノルズ数 Re ($Re = uD_b/\nu$; ν は水の動粘性係数(m^2/s), u は断面平均流速(m/s), D_b は実物のブロック高さ(m))は 3.1×10^6 であったのに対し、実験のBMの Re

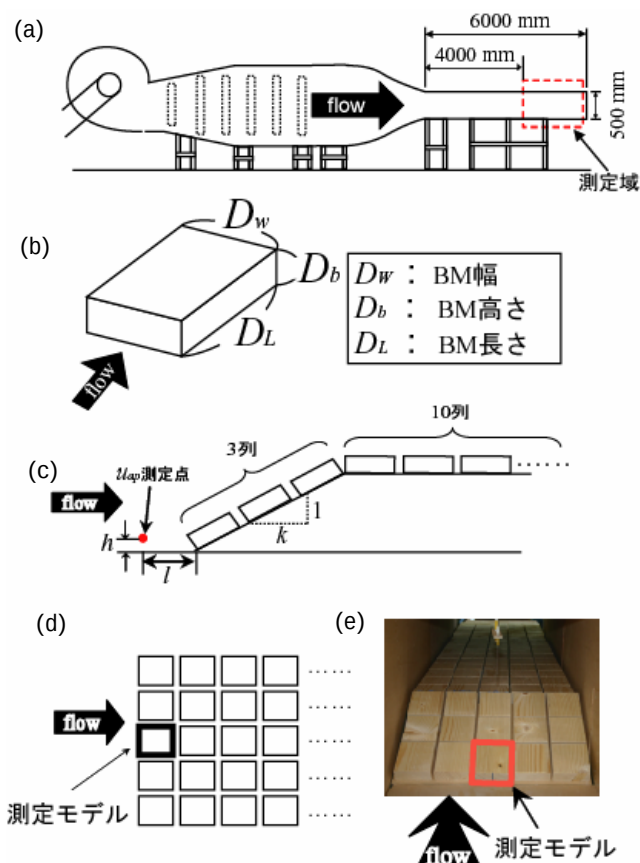


図-1 実験装置概要

(a)風洞全体図 (b)BM立体図 (c)BM群全体の断面図 (d)BM群全体の上面図 (e)BM群写真 (BMは護床ブロックモデル)

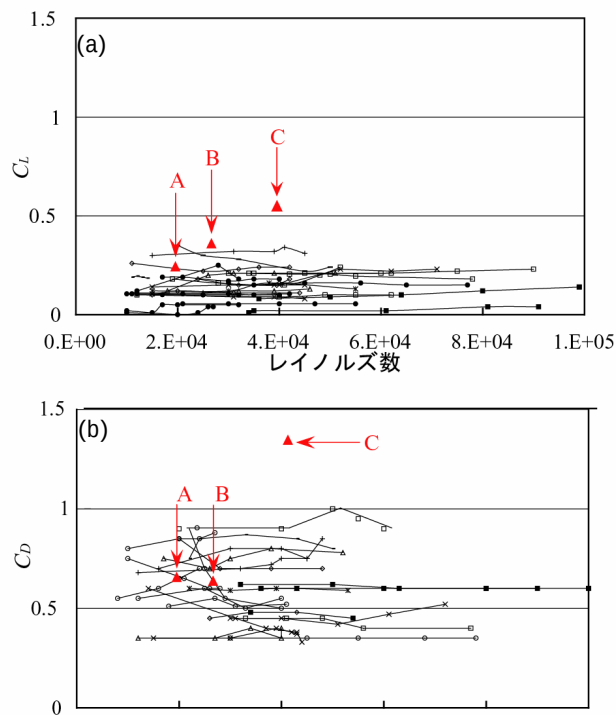


図-2 田村ら³⁾の実験との比較

(a)揚力係数 (b)抗力係数

(図中の赤プロットは本研究におけるブロック単体実験の結果を示す。A; $D_b=19mm$, B; $D_b=28mm$, C; $D_b=38mm$)

は 1.8×10^4 である(ただし、 R_e 算出の際には ν は空気動粘性係数、 u はブロック中央高さ($D_b/2$)の時間平均流速を用いた)。このレイノルズ数の違いであるが、田村ら³⁾によるとレイノルズ数が 1.0×10^4 を超えれば揚力係数、抗力係数はほぼ一定値を示すので、解析結果に大きな影響を与えることはないと考える。

また、図-1(c)に示すように、実験で設定する斜面勾配 $1/k$ は、斜面に設置していない場合($1/k=0$)、荒川明戸サイフォン地点の根入れ勾配と同程度の斜面勾配($1/k=1/3$)、荒川明戸サイフォン地点の根入れ勾配よりも急な斜面勾配($1/k=1/2$)の3パターンとした。また、福岡ら⁹⁾によると、無次元洗掘深(D_s/D_b)が $0.2 \sim 0.3$ で揚力係数が最大となることが報告されている。護床ブロックの不安定条件を明らかにするためには、最も不安定な条件(揚力が大)を把握する必要がある。そのため、BM下の洗掘深 D_s は無次元洗掘深 $D_s/D_b=0, 0.29$ となるような2ケースを対象に実験を行った。しかし、揚力が最大となる無次元洗掘深は護床ブロック形状によって変化すると考えられる。今回の検討では護床ブロック下に洗掘の有無のより揚力・抗力特性や不安定条件がどのように変化するかを検討するためにこの値を考慮した。また、福岡ら⁹⁾は、護床ブロック下の間隙形状として護床ブロックの下側に一樣な空隙ができるものと、斜めに間隙ができるものの2種類を考えている(図-3(b))において点線で示すのが斜めの間隙、実線が一樣な間隙)。本研究では、BMの下に一樣な間隙を考えた。また、洗掘は測定モデルの下のみが発生するものとした。その理由としては明戸地点を例にとると河川の横断方向に様々な地層が入り組んでいることから、地層によって洗掘速度が異なるため一樣な洗掘は起こらないと考えたからである。

風速 u_{cen} は風洞断面中心の中央高さで $20(\text{m/s})$ を発生させた。また、斜面設置時には、設置前に風速を測定し使用した。また、斜面に設置した場合には斜面の影響によって風速分布は異なってくると考えられるが、測定位置がブロック群の先端であること、また、風洞の高さが $50(\text{cm})$ なのに対して、測定ブロックの高さ D_b が $2(\text{cm})$ ととても小さいことなどから影響はないと考える。実験条件を表-1に示す。BMを風洞に設置する際、図-1(c)、(d)、(e)に示すように、横断方向に5列、流下方向に13列設置し、最も上流側中央のBMに3分力計(SSK, LB-60)を設置

し揚力 F_L 、抗力 F_D を同時計測した。BMの設置配列数に関しては、護床ブロック群先端に大きな揚力、抗力が作用すると考えられることから、一般的な護床ブロック群先端のブロックの揚力・抗力特性を把握するために決定したものであり、明戸地点とは異なる。しかし、明戸地点と同程度の斜面勾配で行っていることなどから先端に働く揚力・抗力特性は同程度になると考え実験を行なった。また、接近風速 $u_{ap}(\text{m/s})$ は熱線風速計(Kanomax, 0249-T5)により計測した。ここで接近流速の測定位置 l は $l=D_b$ 、高さ h は $h=D_b/2$ である(図-1(c))。揚力、抗力、風速の計測はサンプリング周波数を $100(\text{Hz})$ 、計測時間を $30(\text{s})$ で実施

表-1 実験条件

根入れ勾配 ($1/k$)	無次元洗掘深 (D_s/D_b)	流速 (m/s) (u_{cen})	レイノルズ数 R_e
0, 1/3, 1/2	0, 0.29	20	18000

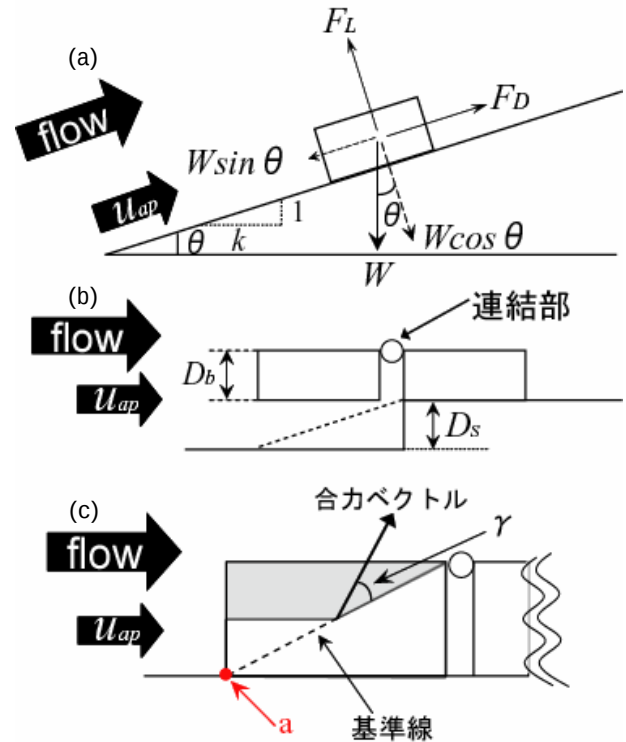


図-3 護床ブロックに作用する力と不安定条件

(a)ブロックに作用する力(u_{ap} , F_D , F_L)は式(1), (2)参照, W は水中重量, $1/k$ が根入れ勾配), (b)洗掘のでき方(点線は斜めの洗掘, 実線は一樣な洗掘), (c)ブロックの不安定範囲

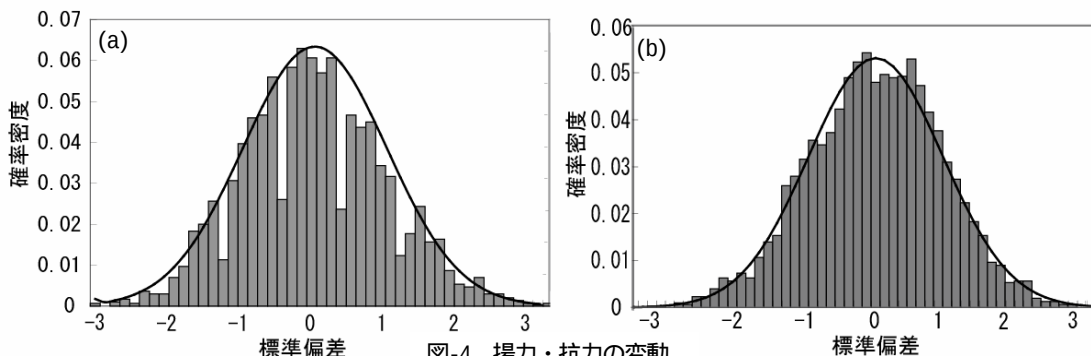


図-4 揚力・抗力の変動

(a)揚力, (b)抗力

した。

測定した揚力 F_L ・抗力 F_D より、それぞれ式(1),(2)を用いて、揚力係数 C_L ・抗力係数 C_D を算出した。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho u_{ap}^2 C_D A_D \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho u_{ap}^2 C_L A_L \quad (2)$$

ここに、 ρ は空気の密度(kg/m^3)、 A_L 、 A_D はそれぞれ揚力作用面積($D_W \times D_b$)、抗力作用面積($D_W \times D_L$) (m^2)である。

また、従来の護岸・護床ブロックの安定性に関する検討では、揚力・抗力の時間平均値から得られた揚力係数・抗力係数を用いている。しかし、護床ブロックに作用する揚力・抗力は乱流の影響により時間的に変動する。そのため、護床ブロックの不安定条件を把握するためには、揚力・抗力の時間変動を考慮する必要があると考えられる。図-4(a),(b)は、それぞれ揚力、抗力の確率分布を示している。この図より、田村ら³⁾、Laskovskiら⁹⁾と同様に、正規分布に従っていることがわかる。そこで、護床ブロックがより不安定になりやすい条件、すなわち揚力の平均値から3標準偏差離れた値に近い揚力係数データ $C_{L_{3\sigma}}$ を取り出し、同様の検討を行なった。なお、このときの抗力係数 $C_{D_{L3\sigma}}$ は $C_{L_{3\sigma}}$ に対応する3つの抗力データを用いた平均値と標準偏差の値で安定条件の解析を行った。

(2) 護床ブロックの不安定条件の把握

図-3(a)に示すように、水中で護床ブロックに作用する力は、揚力 F_L 、抗力 F_D 、水中重量 W である。これらの合力によるモーメントがブロックを上向きに回転させる方向に作用すれば、ブロックは不安定になると考える。本研究では、図-3(b),(c)に示すように、連結されたブロック上部をモーメントの回転軸とし、回転軸と物体の重心を通過する線を、不安定条件を判断する基準線とした。また、基準線よりも上、かつ物体の中心よりも下側に合力ベクトルが向いた場合には、回転軸が点aに移動するため不安定にならないと判断した。上記を踏まえ、合力ベクトルと基準線の成す角度 γ が $0^\circ \sim 160^\circ$ の場合、ブロックが不安定になる条件と定義した。また、基準線から反時

計回り、時計回りにとった角度を、それぞれ正・負の値で示すものとする。

上記の不安定条件をもとに、荒川明戸地点を対象に2007年9月洪水(およそ30年確率洪水)時の流速 $v=5.7(\text{m/s})$ および $v=6.3(\text{m/s})$ (200年確率洪水)を用いて(荒川上流河川事務所資料参考)、護床ブロックの不安定さを検討した。30年確率洪水の流速は、2007年9月洪水の際に痕跡水位から求めたもの、また、200年確率洪水の流速は荒川上流河川事務所資料の値を使用した。ここで、根入れ面に設置した場合の洗掘についてであるが、明戸地点での2007年9月洪水では1.5m程度河床が洗掘している。もし、1/3勾配で3列明戸地点にブロックを設置した場合には最深部で1.8m程度になるためブロック下まで洗掘が発生する可能性があると考えた。しかし、実際の洗掘を考えた場合と実験条件では接近流の特性が異なってくる。接近流の特性については今後の課題である。また、不安定になることを防ぐために必要なブロックの空中重量を把握するため、ブロックの重量を3000kgf $\sim$ 8000kgf(29.4-78.4kN)まで変化させて同様の検討を行なった。安定条件の解析においては、 A_D 、 A_L は、護床ブロックの寸法を元に計算し、 $A_D=1.08(\text{m}^2)$ 、 $A_L=2.50(\text{m}^2)$ とした。

3. 結果および考察

図-5(a)に実験より求めた時間平均の揚力係数 $C_{L_{ave}}$ ・抗力係数 $C_{D_{ave}}$ 、図-5(b)に時間平均から3標準偏差離れた揚力値での揚力係数 $C_{L_{3\sigma}}$ 、対応する抗力係数 $C_{D_{L3\sigma}}$ と無次元洗掘深 D_s/D_b の関係を示す。斜面勾配があり洗掘深が0のケースでは C_L が負の値をとっている。ここで係数が負というのは揚力が斜面方向(下向き)に働いているということを示している。これは流れがブロック上面に作用し、斜面直交方向に押す力が揚力よりも強く作用したためである。このことより、根入れ面に設置された護床ブロックは、上部の土砂が洗掘されむき出しになっても不安定にはなりにくいと考えられる。また、洗掘を想定した全てのケースにおいて揚力係数が正の値を示している。これは

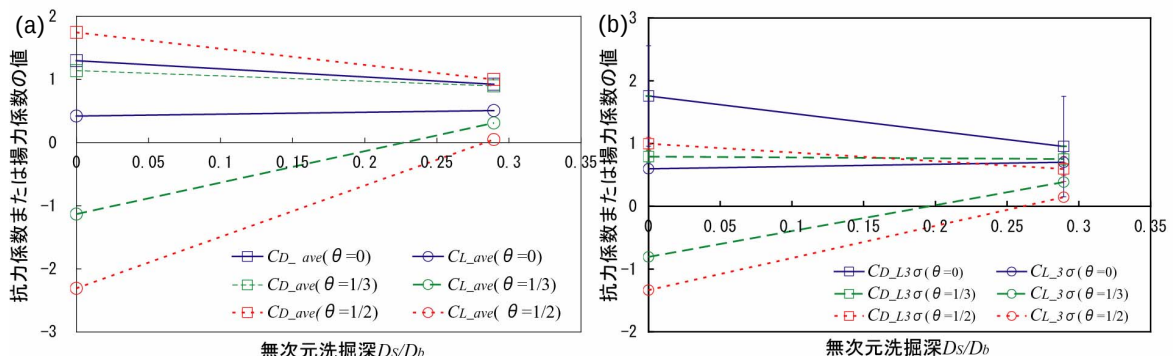


図-5 揚力係数・抗力係数

(a) 揚力・抗力の平均値を使用した場合の $C_{D_{ave}}$ 、 $C_{L_{ave}}$ (無次元洗掘深 D_s/D_b は表-1、図-3(b)参照)

(b) 揚力から3標準偏差離れた値での $C_{L_{3\sigma}}$ と対応する抗力から算出した $C_{D_{L3\sigma}}$

根入れ面に設置しても洗掘が発生することによって、不安定になりやすくなることを示している。また、斜面勾配が急になるにつれて揚力係数が小さくなっていることも確認できる。また、 $C_{L_{3\sigma}}$ は $C_{L_{ave}}$ に比べ大きな値となっている。ブロックの不安定性の検討では揚力の大小が非常に重要になってくるため、時間平均値($C_{L_{ave}}$)を用いるより平均値から3標準偏差離れた値($C_{L_{3\sigma}}$)を用いたほうが、護床ブロックが不安定になりやすくなっていると考え

えられる。

(1) 揚力係数・抗力係数の時間平均値を使用した場合のブロックの安定条件

図-6(a)に示すように、根入れ勾配 $1/k=0$ の場合なければ30年および、200年確率規模の洪水時でも3000kgf以上の空中重量があれば不安定にはならない。しかし、洗掘が発生すると30年および200年確率規模の洪水の場合、そ

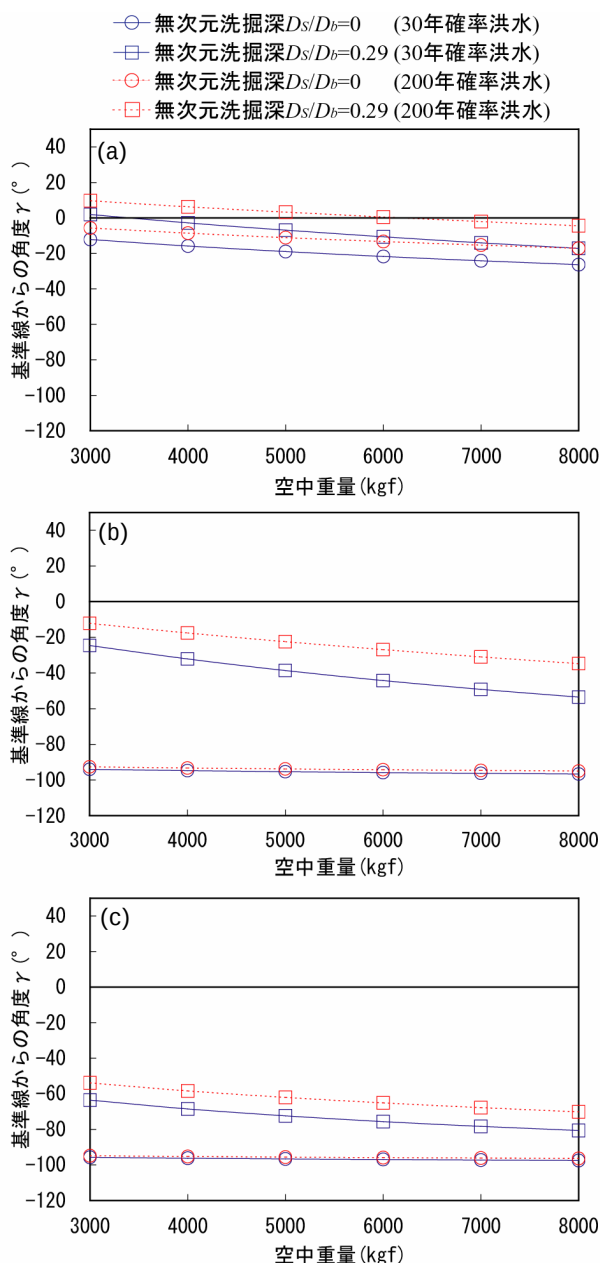


図-6 測定値の平均値を用いて算出した $C_{L_{ave}} \cdot C_{D_{ave}}$ と根入れ勾配 $1/k$ ・重量 W による不安定条件の変化

(a) 根入れ勾配なしの場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定, (b) 根入れ勾配1/3の場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定, (c) 根入れ勾配1/2の場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定

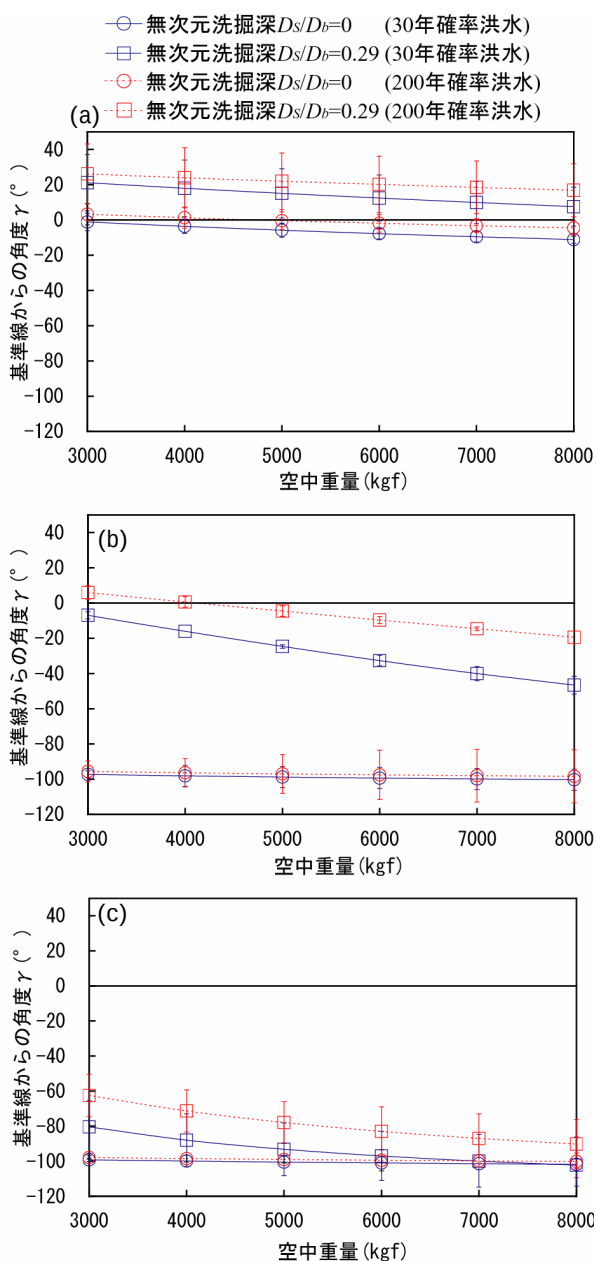


図-7 測定値の平均値から3標準偏差離れた値を用いて算出した $C_{L_{3\sigma}} \cdot C_{D_{L3\sigma}}$ と根入れ勾配 $1/k$ ・重量 W による不安定条件の変化(バーは標準偏差を用いた解析結果の幅を示す)

(a) 根入れ勾配なしの場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定, (b) 根入れ勾配1/3の場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定, (c) 根入れ勾配1/2の場合に1/30洪水, 1/200洪水を想定した不安定判定

れぞれ空中重量が3000kgf、6000kgf以下の護床ブロックでも不安定になることを示している。このことより、洪水以前の荒川明戸サイフォン地点での3000kgfの護床ブロックの被災の際には、洗掘が発生していたのではないかと考えることが出来る。よって、護床ブロックが不安定になることを防ぐためにはブロック下部に洗掘を生じさせないことが重要であると考えられる。

図-6(b), (c)は、根入れ勾配が、それぞれ、 $1/k=1/3, 1/2$ の解析結果を示している。これらの図は、洗掘深の有無や確率規模の大小によらず、安定であることを示している。さらに $1/k$ が急勾配になるほど、安定になっていることを示している。よって、揚力係数・抗力係数の時間平均値を使用した解析では、荒川明戸サイフォン地点での護床ブロック上流端を傾斜させ根入れするという対応策は妥当であったと考えることが出来る。

(2) 平均値から3標準偏差離れた揚力係数・抗力係数を使用した場合のブロックの安定条件

図-7(a)($1/k=0$ の場合)に示すように、200年確率規模の洪水時には、洗掘の有無に拘わらず、今回検討したブロックの空中重量では不安定になることを防ぐことが出来ない。また、30年確率規模の洪水時には、洗掘が発生している場合、今回検討したブロック重量では不安定になることを抑えることが出来ず、洗掘が発生していない場合でも空中重量5000kgf以下のブロックは不安定になってしまう。また、図-7(b), (c)は、それぞれ根入れ勾配 $1/k=1/3, 1/2$ の解析結果を示している。図-7(c)では、 $C_{L_{ave}}, C_{D_{ave}}$ を用いた検討結果(図-6(c))と同様、洗掘の有無や洪水規模によらずブロックは不安定にならない。しかし、図-7(b)では、洗掘があれば、4000kgf以下のブロックは不安定になる可能性があることがわかる。平均値から3標準偏差離れた揚力係数・抗力係数を使用した解析結果より、不安定になる可能性を低くするには、根入れ勾配を $1/2$ 程度にすることが必要であると考えられる。

$C_{L_{3\sigma}}, C_{D_{L3\sigma}}$ を用いて把握したブロックの不安定条件は、誤差の値を含めると $C_{L_{ave}}, C_{D_{ave}}$ を用いた場合に比べ、不安定になりやすくなることがわかる。よって、護床ブロックの安定性を検討する際には、揚力・抗力の時間変動を考慮する必要があると考えられる。なお、3標準偏差離れた値が、不安定条件ではなく転倒そのものにどのように影響するかは今後の検討課題としたい。

4. おわりに

本研究により得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 護床ブロックを平面に設置した場合、計測値の平均値での $C_{L_{ave}}, C_{D_{ave}}$ を使用し安定条件を検討するとブロック下部に洗掘を想定した場合に不安定となることがわ

かった。ブロック下部に洗掘が発生していないかモニタリングし、管理する必要がある。

- 2) 根入れ勾配 ($1/2$ と $1/3$) 条件において、根入れ面に護床ブロックを設置した場合には、平置きにした場合よりも不安定になることを抑えることができる。
- 3) $C_{L_{3\sigma}}, C_{D_{L3\sigma}}$ を用いて解析を行うと、 $C_{L_{ave}}, C_{D_{ave}}$ を用いた場合に比べ、不安定になる。このことから、ブロックの安定性の照査の際には揚力・抗力の変動値を考慮すべきである。

しかし、流速が変動する条件下で不安定条件になったとしても、その次の瞬間には揚力・抗力とも変動するため、今回示した不安定条件が直接ブロックの破壊につながるとはいえない。乱流条件下での破壊現象そのものについては更なる検討が必要と考えられる。

謝辞：平成19年度河川整備基金・助成事業（代表：中川一）の一部を使用した。国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所に、荒川明戸サイフォン地点の護床ブロックの被災に関する資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 神田佳一，村本嘉雄，藤田裕一郎：護床ブロック下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究，土木学会論文集，No.551，pp.21-36，1996。
- 2) 内田龍彦，河原能久，池田麻矢，渡邊明英：段落ち部下流の礫河川に作用する流体力とその変動に関する基礎的研究，第4回流体力の評価とその応力に関するシンポジウム，CD-ROM，2005。
- 3) 田村正秀，木下正暢，浜口憲一郎，阿部康紀：護床ブロックの形状と抗力・揚力特性について，第2回流体力の評価とその応力に関するシンポジウム，pp.1-8，2003。
- 4) 前田英史，梅田明宏，高田保彦，神田佳一，八嶋厚：ジオテキスタイル製ふとん籠に作用する流体力の評価と設計に関する実験的研究，第3回流体力の評価とその応力に関するシンポジウム，pp.77-84，2004。
- 5) 大西外明，卜部周一：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，水工学論文集，第34巻，pp.349-354，1990。
- 6) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸法覆工の水理設計法に関する研究，土木研究資料，第2635号，pp.25-27，1988。
- 7) 中野晋，都浩輔，三井宏：緩傾斜堤被覆ブロックの安定限界，海洋開発論文集，Vol.9，pp.319-324，1993。
- 8) 太田恵子：緩傾斜一層被覆ブロックの被害機構に関する実験的研究，海洋開発論文集，第15巻，pp.43-45，1999。
- 9) Laskovski,D.,Stevenson,P.,Zhou,J. and Galvin,K.P.：Distribution of lift forces on a cubic particle exhibiting sporadic movement during hydraulic conveying，Powder technology 179，pp.59-64，2007。

(2008.9.30受付)