

# 護床工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験

## EXPERIMENTS ON THE FAILURE OF THE BED PROTECTIVE WORK

内田龍彦<sup>1</sup>・田中幸志<sup>2</sup>・福岡捷二<sup>3</sup>

Tatsuhiko UCHIDA, Koshi TANAKA and Shoji FUKUOKA

<sup>1</sup>学生会員 工修 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 環境工学専攻  
(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 社会環境システム専攻 (同上)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学大学院教授 工学研究科 社会環境システム専攻 (同上)

The bed protective work is installed to prevent structural damage due to bed scouring. However, bed scouring can also occur just downstream of the bed protective work and the last row elements suffers the largest hydrodynamic forces due to large water surface profile accompanied by a drop of water level. Therefore, we need to review the design method.

The purpose of this paper is to clarify the failure mechanism of bed protective works based on dynamical basis. First, we examined the failure mechanism of bed protective blocks due to drop in water level downstream of the blocks. Then, we measure the hydrodynamic forces acting on the last row elements in the threshold of block movement and consider the threshold of block movement through experiments.

**Key Words :** *bed protective work, last row elements, threshold of block movement, failure of structure, hydrodynamic force*

### 1. 序論

河川横断構造物の直下流部は、射流から跳水に至る激しい流れによって河床洗掘が生じる。また、上流からの土砂供給量の減少により下流の河床は低下傾向にある。このような河床の洗掘及び低下に伴う構造物の損傷を防ぐために、構造物の下流には護床工が設置される<sup>1), 2)</sup>。しかし、護床ブロック群の直下流部でも同様の機構で河床洗掘による護床工の変形、破壊が起こる。護床工が破壊されると付随する構造物の安定性の低下や損傷を招くため、護床工の破壊機構を明らかにすることは治水上、重要な事項である。

護床工の破壊機構に関する既往の研究には以下のものが挙げられる。神田<sup>3)</sup>らは、様々な護床ブロックの形状や河床材料を用いて護床工下流部の洗掘過程の特徴を明らかにし、洗掘対策法を提案している。福岡<sup>4)</sup>らは、河床を洗掘から守るために、流水に対して護床工は安定でかつ適度な流水低減効果を持つ必要があることを示し、ブロックの流体力特性と必要重量算定法を検討している。

著者ら<sup>5), 6)</sup>は、流体力の直接計測から護床工を構成する最下流の粗度要素には水位差に起因して大きな流体力が作用すること、及び下流の河床洗掘により破壊し易くなることを示した。福岡らの研究では、護床工に作用する流体力特性を示したが、移動限界時に作用する流体力の算定には至っていない。前野ら<sup>7)</sup>は、自然石を用いた堰の破壊機構を流れ場と石礫の初動機構に着目した力学モデルにより検討している。川口ら<sup>8)</sup>は、護床工下流部の跳水による流れと変形・流失機構を移動床実験により検討し、護床工下流の袋体が滑動する時に作用する流体力を見事な工夫によって測定し、これを評価した。この時流体力の測定は、袋体1基のみが対象とされており、ブロックが相互に噛み合わさって設置される護床ブロック群については噛み合わせを含めた検討が必要である。このように、護床工の破壊機構には不明な点が多い。

本研究では、護床ブロック群の破壊機構を調べ、ブロック群からなる護床工の設計法の基礎を確立することを目的とする。最初に、水位低下に伴う護床ブロック群の破壊機構を下流部の流れ場と比較し検討する。そして、護床工の弱点箇所である最下流に位置するブロックの移

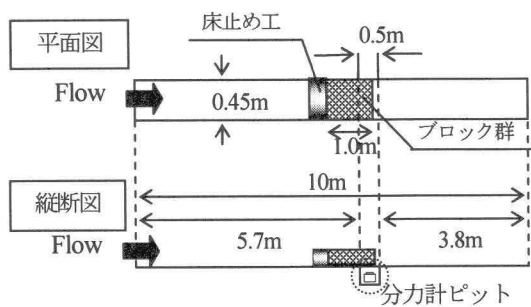


図-1 実験水路図

表-1 護床ブロック諸元

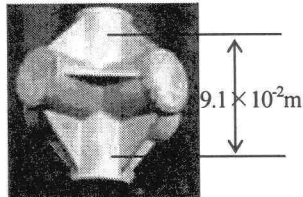


図-2 護床ブロック

代表長さ	$9.1 \times 10^{-2}(\text{m})$
体積	$2.4 \times 10^{-4}(\text{m}^3)$
比重	2.3
配置	乱積み

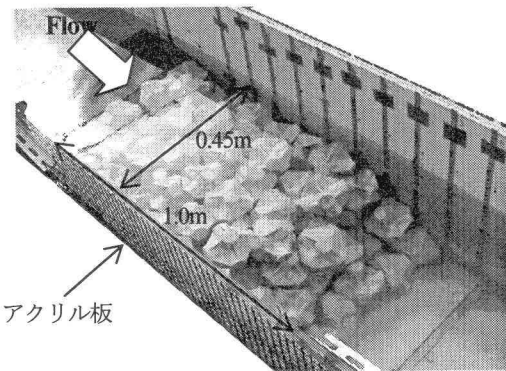


図-3 護床ブロック群

表-2 実験条件

	単位幅流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	ブロック群 体積密度	下流端水位 (m)
Case1	$7.5 \times 10^{-2}$	0.34	0.26~0.13
Case2	$7.5 \times 10^{-2}$	0.39	0.25~0.14
Case3	$7.5 \times 10^{-2}$	0.38	0.26~0.16

動限界時に作用する流体力を測定し、ブロックの移動限界を検討する。

## 2. 護床ブロック群の破壊実験

### (1) 実験方法及び条件

実験水路を図-1に示す。実験水路は全長10m、水路幅0.45m、河床勾配1/500の直線水路である。護床ブロック群の破壊状況が観察できるように、護床ブロック群設置範囲の右岸側壁に透明なアクリル板を設置し、ビデオ撮影を行う。図-2、表-1に護床ブロックの形状と諸元を示す。護床ブロック群は、図-3に示すように水路中央付近の床止め工下流約1.0mの範囲に4層積み相当の高さ約0.24mで乱積みを設置する。

表-2に実験条件を示す。護床ブロック群の設置条件が周囲の流れ場や破壊機構にどのように影響するかを検討するため、ブロック群体積密度を変えた実験を行う。各断面において、最上層に位置するブロックの横断平均高さを測定し、これをブロック群の縦断形状とする。ブロック群体積密度は、縦断形状から算出したブロック群の体積に対するブロックの総体積（総ブロック数×ブロック1個の体積）の比である。護床ブロック群の破壊を生じさせる原因として、河床の低下や洗掘による流れの状況の変化による流体力の増大が考えられる。この状態の外力変化を下流端水位の低下により実現し、流量一定の条件下で護床ブロック群の破壊を生じさせる。流速は電磁流速計を用いて測定し、ブロック群内部はその空隙内で測定可能な範囲まで行う。

### (2) 実験結果及び考察

護床ブロック群下流部の変形・破壊、流失とそれに伴う流れ場の変化を検討する。図-4にCase1の破壊に至る

までの縦断水面形とブロック群の縦断形状の変化を示す。下流端水位の低下に伴いブロック群下流部で水面勾配は大きくなる。このため、ブロック群上層部の最下流ブロック（以下、最下流ブロック）には大きな流体力が作用し、流失する。最下流ブロックが流失する時の運動形態は様々であるが、移動開始時は回転である。最下流ブロックが流失すると、流失したブロックの直上流の上層ブロックが連鎖的に流失する。流失したブロック群は下流に輸送され、ブロック群の下流に留まる。安定した状態からさらに下流端水位が低下すると、再びブロック群下流部で水面勾配が大きくなり、下流部からブロックの流失が生じる。このようにブロック群の破壊は、水位低下によってブロック群最下流部で流体力が大きくなり、最下流ブロックが流失し、下流から上流へ進行する。実験では、最終的なブロック群下流部の安定勾配は1/5~1/7となり、破壊後のブロック群形状は緩やかな階段形状を成す。

次に、護床ブロック群の破壊と流速場について検討する。図-5、図-6はそれぞれCase3の破壊前後の主流速コンターである。図-5に示すように破壊前では、下流端水位が低下すると、流れはブロック群下流部でブロック群内に流れ込むようになる。これは、水面勾配が大きくなることと下流上層部のようなブロック群の端では空隙が大きく抵抗力が小さいためである。また、ブロック群直下流部では段差による剥離が生じている。これらが最下流ブロックに作用する流体力を増大させると考えられる。図-6に示すように破壊後では、下流端水位の低下により、剥離領域が破壊前よりも小さくなり、ブロック群に沿う流れ場が形成される。

図-7は水位低下に伴うブロック群体積密度の変化である。横軸は下流端水位と護床ブロック群前面の平均高さ

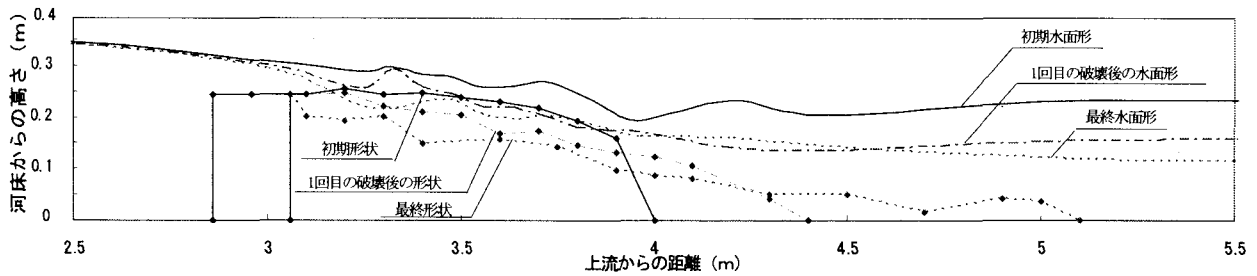


図-4 縦断水面形とブロック群の縦断形状の変化 (Case1)

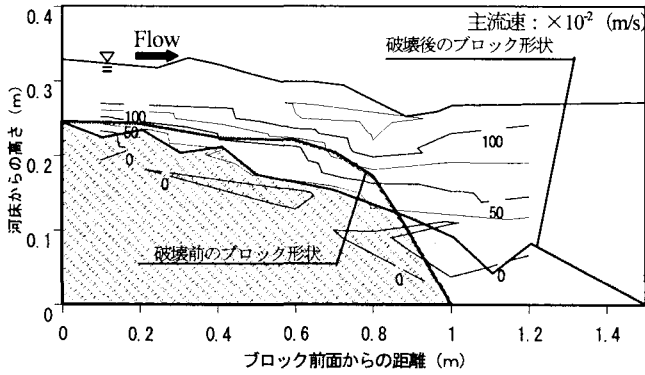


図-5 破壊前の主流速コンター (Case3)

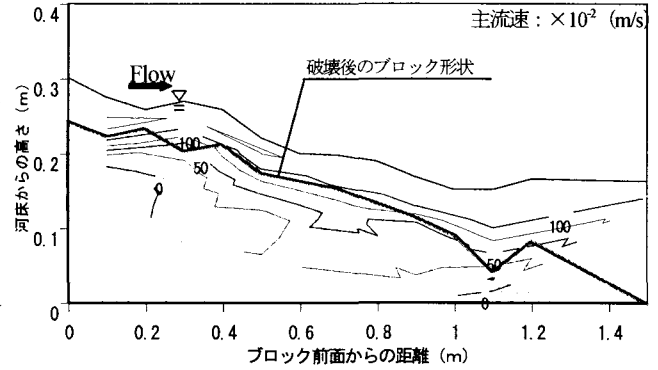


図-6 破壊後の主流速コンター (Case3)

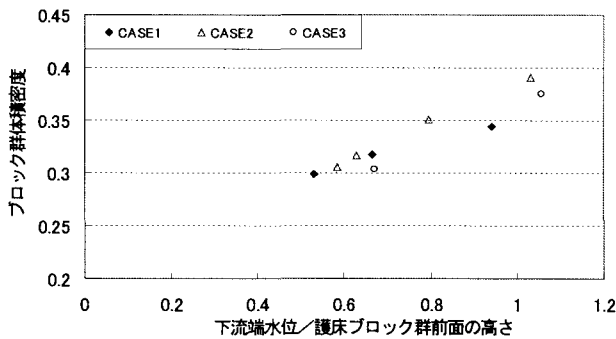


図-7 ブロック群体積密度の水位低下に伴う変化

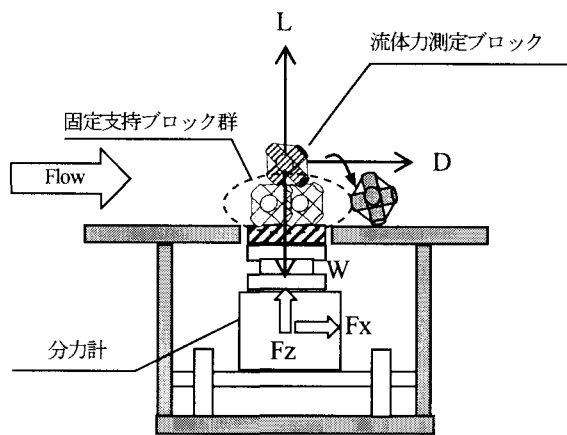


図-8 流体力測定法

の比である。体積密度の大きいCase2,3はCase1に比べて、初期の安定状態から一回目の破壊に至るまでの下流端水位の差が大きい。これは、体積密度が大きい場合、ブロックは相互に噛み合っており、ブロックの抵抗力は増加するためと考えられる。また、すべてのCaseにおいて破壊が生じると同時にブロック群体積密度は減少し、Case2,3はCase1よりもその減少率は大きい。これは、体積密度

が大きい場合、ブロックの抵抗力は増加するが、一度破壊が生じるとそれに伴うブロックの流失量は大きく、ブロック群形状が大きく変化するためと考えられる。

以上のことから、水面勾配が大きく、圧力差が大きくなる最下流ブロックが破壊のきっかけとなり、その後護床ブロック群が連鎖的に破壊する。また、ブロック群体積密度が大きい場合、ブロックは相互に噛み合い流れに対する抵抗力は増大する。

### 3. 護床工最下流粗度要素の移動限界実験

固定された物体に作用する流体力を測定し検討した研究<sup>5) 6)</sup>は数多く見られるが、物体の移動限界時に作用する流体力の測定法はあまり例がない。川口ら<sup>8)</sup>は袋体に作用する流体力を、袋体から河床面に作用する力を通して測定している。本実験では、それを応用し、護床ブロック群最下流ブロックの移動限界時に作用する流体力を測定し、流体力と噛み合わせ効果の関係を検討している。

#### (1) 実験方法及び条件

図-8に分力計を用いた移動限界時のブロック単体に作用する流体力の測定法を示す。流体力は、流下方向成分をFx、鉛直上向きの成分をFzと定義する。流体力測定ブロックを支持する下層のブロック群(以下、固定支持ブロック群)は分力計と結合されており、流体力測定ブロックのみが移動できる。固定支持ブロック群及び流体力測定ブロックには他のブロックが衝突しないように、その周辺ブロック群は固定している。

流体力測定は、ブロック群形状によって流れ場が変化

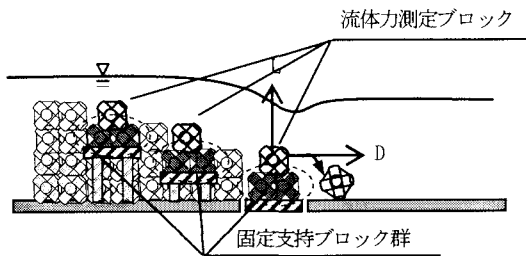


図-9 護床工下流部のブロック群形状

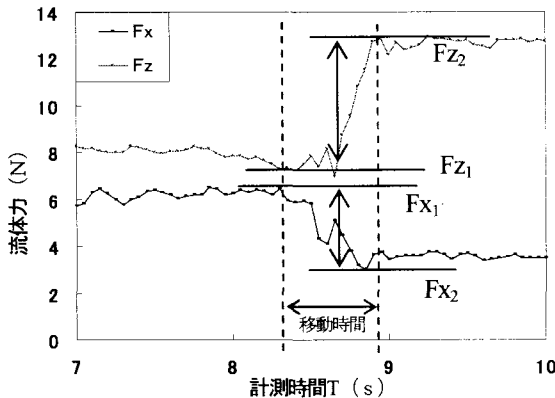


図-10 流体力測定ブロック移動前後の流体力の時間変化 (2層積み)

した場合の流体力を検討するため、図-9に示すように護床ブロック群下流部4層、3層、2層積み相当の高さで配置される形状で行う。実験では、噛み合わせ厚さを変えて、流量一定の条件下で徐々に下流端水位を下げ流体力測定ブロックの移動を生じさせる。

移動限界時に作用する流体力の算定方法を示す。図-10は、下流部2層積みの流体力測定ブロック移動前後の流体力の時間変化である。流体力測定ブロックが固定支持ブロック群の上にあるとき、これらに作用する力の合力が分力計より出力される。流体力測定ブロックが移動し離脱すると、分力計には固定支持ブロックに作用する力のみが出力されるため、流体力は流下方向に小さく、一方鉛直方向には大きくなる。この流体力の変化は、移動限界時に流体力測定ブロックに作用していた外力を示す。ここでは、流体力測定ブロックの移動前後における流体力の最大値と最小値の差を移動限界時に作用する外力とする。Fx<sub>1</sub>、Fz<sub>1</sub>をブロック移動前、Fx<sub>2</sub>、Fz<sub>2</sub>をブロック移動後の外力とすると、移動限界時の流体力D、Lは式(1)で算出できる。

$$\begin{aligned} D &= Fx_1 - Fx_2 \\ L &= Fz_1 - Fz_2 + W \end{aligned} \quad (1)$$

Wはブロック水中重量である。

精度良い算定を行うには、流体力測定ブロック移動前後の流体力値を適切に抽出する必要がある。流体力測定ブロックが移動する時間は、分力計の出力結果とビデオ映像より得られた時間を比較し確認している。また、この算定法の妥当性を検証するため、既知の重量の物体を分力計に載せ、取り外した時の出力値から同様の方法で物体重量を算出したところ、その誤差は5%程度であった。

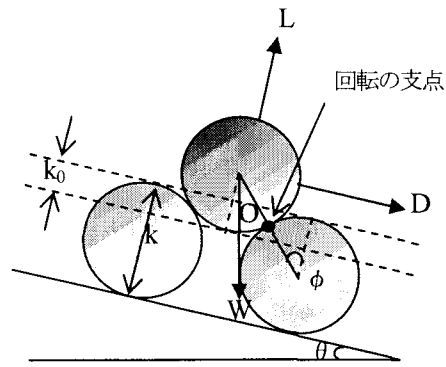


図-11 護床ブロックの二次元モデル

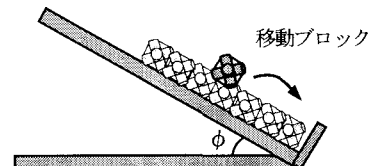


図-12 係数Cに関する基礎実験

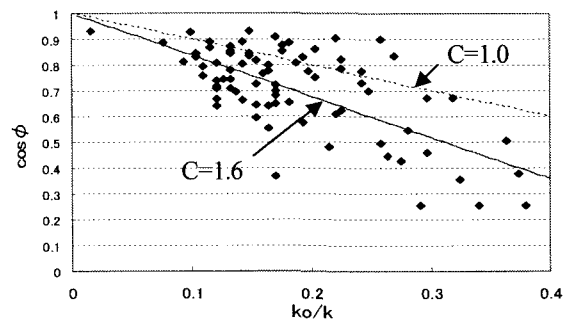


図-13 無次元噛み合わせ厚さと安定限界斜面勾配の関係

## (2) ブロック移動限界の力学モデル

図-11は護床ブロックを二次元の円形とした時のブロックに作用する外力とブロックの配置を示したものである。2章で述べたように、ブロックの初期運動はモーメントによる回転運動であり、護床ブロックの抵抗力はブロック相互の噛み合わせの影響を強く受ける。ここで、噛み合わせ厚さk<sub>0</sub>を図-11に示すように定義する。噛み合わせ厚さk<sub>0</sub>が大きいほど回転の支点は上に移動し、ブロックの移動に対する抵抗力は大きくなる。ブロックが円形であるとき、回転の支点は点Oとなり、移動限界式は式(2)で表される。

$$W = \frac{\rho}{\rho - \rho_w} \left( \frac{\beta_D \cdot D + \beta_L \cdot \tan \phi \cdot L}{\tan \phi \cdot \cos \theta - \sin \theta} \right) \quad (2)$$

式(2)の分母は流体力による駆動力、分子はブロックの抵抗力をそれぞれ表している。式(2)の各係数は式(3)、(4)のように定義される。

$$\beta_D = 1 + \frac{\alpha_D}{\cos \phi}, \quad \beta_L = 1 - \frac{\alpha_L}{\sin \phi} \quad (3)$$

$$\cos \phi = 1 - C \frac{k_0}{k} \quad (4)$$

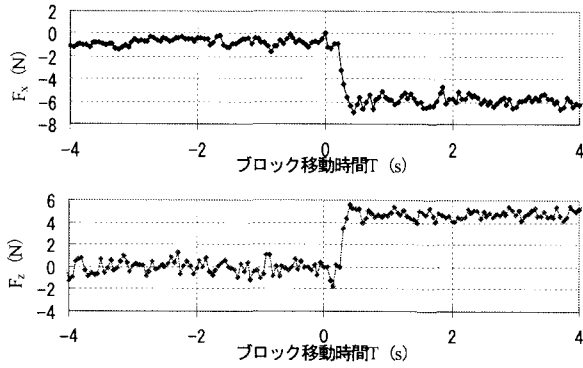


図-14 CaseAの流体力変化

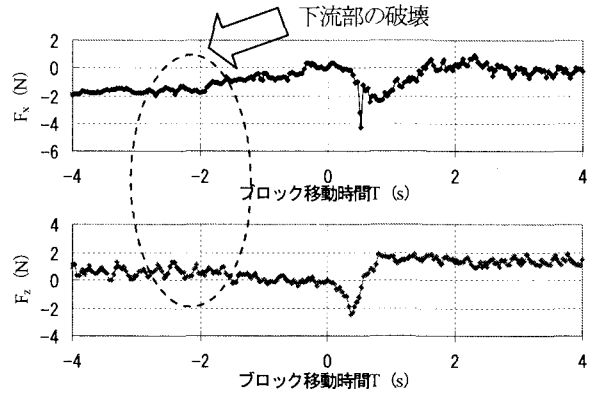


図-15 CaseBの流体力変化

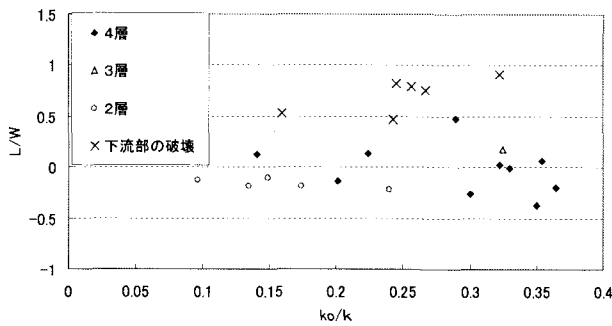


図-16  $k_0/k$ と $L/W$ の関係

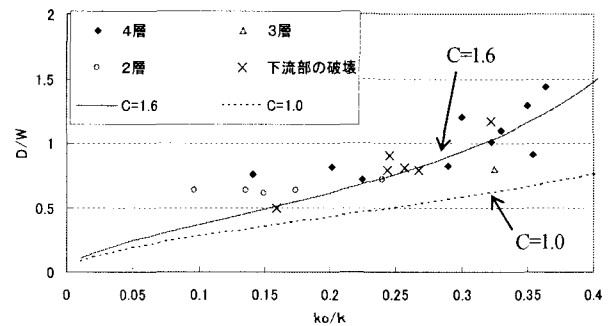


図-17  $k_0/k$ と $D/W$ の関係

ここで、 $k$ はブロック高、 $\theta$ は河床勾配、 $\alpha_D$ 、 $\alpha_L$ は抗力、揚力の作用点の図心からのずれを補正する係数、 $\phi$ はブロックの安定限界斜面勾配である。ここで、式(4)では、ブロックを円形でモデル化したことによる補正をブロック形状係数 $C$ で表現している。

ブロック形状係数 $C$ を算出するために図-12に示す実験を行う。式(2)から分かるように $\theta = \phi$ のとき、ブロックは移動限界に達する。図-13に無次元噛み合わせ厚さ $k_0/k$ と安定限界斜面勾配 $\phi$ の関係を示す。 $C$ の平均値は1.6となるが、実験値にはばらつきがある。安全側に評価するには実験結果をすべてカバーする $C$ をばらつきを考慮し採用するのが妥当であると考えられる。しかし、ここでは外力に対するブロックの抵抗力は、80%で概ね移動しない安全側と考える。これより $\theta$ を移動限界角 $\phi$ とした場合、 $C=1.0$ となる。

### (3) 実験結果及び考察

2章で示したように、護床ブロック群の破壊は、最下流に位置するブロックの移動がきっかけとなり下流から上流へと破壊が生じる。破壊のきっかけとなるブロック（流体力測定ブロック）が移動する場合をCaseA、流体力測定ブロックの背後下流部のブロック群の破壊に伴い連動して流体力測定ブロックが移動する場合をCaseBとし、図-14、図-15にそれぞれの移動限界時の流体力変化を示す。図-14、図-15の横軸、縦軸はそれぞれブロック移動時間と流体力を表し、流体力測定ブロックの移動開始時間及びその時に作用する流体力を0として

いる。 $F_x$ は、2Caseとも下流端水位の低下に伴い徐々に大きくなるが、CaseBでは下流部が破壊するとそれに伴いさらに $F_x$ は大きくなる。これは下流のブロックが流失することにより、護床ブロック群直下流部の圧力が低下するためである。CaseBの $F_z$ は、下流ブロックの流失によって流れの鉛直下向き成分が大きくなるため、鉛直下向きに大きくなる。また、CaseBではブロック移動前後の流体力の時間変動がCaseAに比べて大きくなる。これは、ブロックの流失によって流れが乱され、局所的な圧力変動が生じるためである。

無次元噛み合わせ厚さ $k_0/k$ によるブロック移動限界時に作用する揚力 $L$ とブロック重量 $W$ の比 $L/W$ の変化を図-16に示す。 $L/W$ は、 $k_0/k$ に直接関係していないこと、及び下流部の破壊を伴うCaseB以外は小さいことが分かる。このため、ブロックを移動させる駆動力は、抗力 $D$ によるモーメントに支配されていると考えられ、以下 $D$ に着目する。

図-17は $k_0/k$ と無次元抗力 $D/W$ の関係である。 $k_0/k$ が0.2以上では、 $k_0/k$ が大きくなるほど $D/W$ は大きくなる。これは、抗力 $D$ は $k_0$ が大きいと上下のブロックが互いに噛み合い、モーメントの回転の支点と $D$ の作用点の距離が小さくなるためである。 $k_0/k$ が小さい0.2以下では、 $D/W$ は $k_0/k$ によらず、ほぼ一定である。これは、 $k_0$ よりブロックの形状の影響を強く受けるためと考えられる。また、異なるブロック群形状を比較すると $D/W$ にあまり違いは見られない。これは、ブロック群形状によって流れ場が変化しても、最下流ブロックの移動限界時に作用する

力の釣り合い条件はあまり変化しないことを示す。また、CaseBの下流ブロックの流失を伴う場合でも抗力DはCaseAと同様の傾向と言える。

計測された実験値と式(2)-(4)による計算値を比較する。ここでは、図-16より揚力 $L=0$ を与え、抗力Dの図心からのずれは考慮せずに計算している( $\beta_D=1.0$ )。図-17の実線、破線は式(2)-(4)により算出された計算値を表している。図-18は実験値Dを用いて計算したブロックの必要重量と実重量の比較である。 $k_0/k$ が0.2以下では、 $D/W$ の計算値は実験値に比べて小さくなり、必要重量を過大評価する傾向にある。これは、 $k_0/k$ が小さくなるほどブロックの突起形状の影響を強く受けるためと考えられる。しかし、護床ブロック群の破壊実験における $k_0/k$ は0.3程度であることから、本実験において、 $k_0/k$ が0.2以下は極端に噛み合わせが小さい特殊な場合と考えられる。 $k_0/k$ が0.2以上では、 $D/W$ の計算値と実験値はほぼ同じ傾向を示す。しかし、実験結果はばらついており、 $C=1.6$ で計算されるブロックの必要重量は、図-18に示すように十分でない場合がある。 $C=1.0$ の場合、 $D/W$ の計算値は実験値をすべてカバーし、必要重量は実重量よりも大きく(1.3~2.1倍)、すべて移動しない安全側に評価できることが分かる。

以上のことから、ブロックを無次元噛み合わせ厚さ $k_0/k$ が0.2以上では、一次元釣り合い式による抗力Dの評価が可能となる。また、ブロック形状係数Cを80%で移動しない安全側に設定した場合、抗力Dに対して移動しない護床ブロックの必要重量が算出可能となる。

#### 4. 結論

本論文では、護床ブロック群の破壊機構を力学的に解明するために、まず護床ブロック群の変形、流失過程とそれに伴う下流の流れ場の変化を比較し検討した。そして、護床工の弱点箇所であり、破壊のきっかけとなる最下流ブロックの移動限界時に作用する流体力を測定し、移動限界時の流体力の特性を力学的に検討した。本実験より得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 下流端水位が低下すると、最下流ブロック周辺で水面勾配が大きくなるため、最下流ブロックは他のブロックより大きな流体力を受け流失する。
- 2) 破壊のきっかけとなる最下流ブロックの流失により、その上流に位置するブロック前後の水位差が大きくなり流体力が大きくなるため、破壊は下流から上流へ進行する。破壊後のブロック群形状は階段状になり、流れはブロック群に沿うようになる。
- 3)  $k_0/k$ が大きくなるほど、抗力Dによる回転モーメントが小さくなり、移動限界時に最下流ブロックに作用する抗力Dは大きくなる。

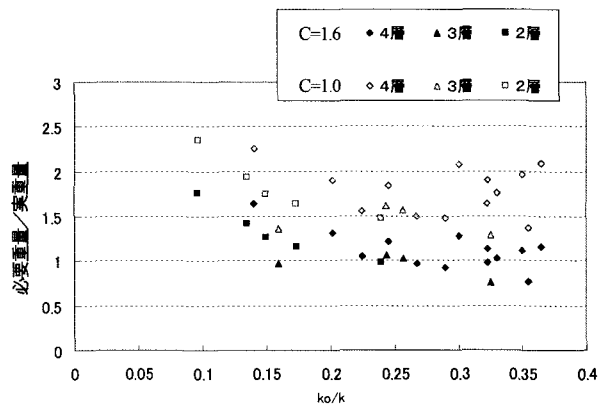


図-18 ブロック必要重量の算出

- 4) 一次元釣り合い式によって最下流ブロックの移動限界重量を評価した。

護床工を設計するためには、護床工に作用する流体力を見積もる必要があるが、最下流ブロックの移動限界時に作用する流体力の定量的評価にはまだ至っていない。流体力の作用点及び揚力の定量的な評価は、流れ場により大きく変化すると考えられる。また、本論文で示したように、ブロックが連動して流出する過程は、圧力の局所的な時間的变化を伴い、流れは複雑になる。このため、護床ブロックの破壊機構については数値解析などを含めてさらに検討する必要があると考えられる。しかし、護床ブロック群の破壊機構を解明するために重要となる護床ブロックの移動限界時に作用する流体力を測定し、破壊機構を力学的に検討した点では、本論文は新しい構造物の設計法に繋がると考えられ、重要な成果と言える。

#### 参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：床止めの構造設計手引き，2001。
- 2) 国土開発技術研究センター：護岸の力学設計法，2000。
- 3) 神田佳一，村本嘉雄，藤田裕一郎：護床工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，第551号，pp.21-36，1996。
- 4) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸法覆工の水利特性に関する研究，土木技術資料30-3，pp.115-120，1998。
- 5) 内田龍彦，福岡捷二，福島琢二，田中正敏：大型粗度群上の浅い流れの平面二次元解析とその応用，土木学会論文集，第691号，pp.93-103，2001。
- 6) 山崎幸栄，福岡捷二，内田龍彦，福島琢二：河川構造物下流の安定性に関する基礎的研究，第56回年次学術講演会概要集，pp.272-273，2001。
- 7) 前野詩朗，道奥康治，森永智，大西利典：捨石堰の破壊機構のモデル化，水工学論文集，第47巻，pp.781-786，2003。
- 8) 河川広司，諏訪義雄，高田保彦，末次忠司：護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非定常性と護床工の応答特性，河川技術論文集，pp.243-248，2002。

(2003. 9. 30受付)