

流れによる護床ブロック群の 変形・破壊の解析

THE ANALYSIS FOR FLOW AND DEFORMATION MECHANISMS OF BED PROTECTIVE WORKS

内田龍彦¹・福岡捷二²

Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

¹ 正会員 博(工) 広島大学大学院 助手 工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² フェロー 工博 Ph. D. 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Bed protective works are installed just downstream of weirs and ground sills to prevent failure and collapse of the structure due to bed scouring. Because a failure of bed protective works exposes the main structure in danger, it is important for river technology and management to maintain the safety of the bed protective works. In this paper, the model of a vertical two-dimensional analysis for the flow with complex boundary shape of blocks is presented, in order to evaluate hydrodynamic forces acting on the blocks. Then, the numerical analysis for deformation and failure mechanism of the blocks based on the criteria for determining whether a block moves are performed. It is clarified through the comparison between measured and computed results that the model can simulate the deformation and failure mechanisms with flow fields.

Key Words : *bed protective works, deformation and failure mechanism, hydrodynamic force, last row elements, vertical two-dimensional model*

1. 序論

堰下流の水叩き工や床止め工などの河道横断構造物の直下流部では河床洗掘による被害を防ぐため、一般に護床工が設置される¹⁾。護床工の被害は構造物本体を危険に晒すため、護床工の安定性を確保することは治水に重要である。

護床工に関する既往の研究では、ブロック群の抵抗特性と洪水時に作用する流体力に対して必要なブロック重量算定法の検討^{2), 3)}、下流の河床洗掘^{4), 5)}や底面土砂の抜け出し⁶⁾など土砂の移動に関するもの、洗掘に対するブロック群の安定性を検討したもの⁷⁾などがある。護床工などの粗度群の最下流粗度要素には、その直下で河床の低下や洗掘が必然的に生じる上に、一般に大きな流体力が作用する⁸⁾ため、護床工下流部においてブロックの移動を完全に防ぐことは困難である。護床工の設計のためにはブロック群の安定性を評価すると共に変形・破壊機構を明らかにする必要があると考えられる。前野ら⁹⁾は自然石を用いた堰の破壊機構を実験によって調べ、石礫の移動限界の力学モデルを検討している。川口ら¹⁰⁾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

用する流体力を測定し、流失時の力学的な検討を可能にしている。内田ら¹¹⁾は下流水位の変化による床止め工下流護床ブロック群の変形・破壊機構を実験により調べ、破壊のきっかけとなる最下流ブロックの移動限界流体力を測定し、これを解析により評価した。しかし、護床ブロック群の変形・破壊機構には不明な点が多く、ブロック群の安定性や変形・破壊機構を評価した調査・研究例は少ない。

護床ブロック群の変形・破壊は、一般に下流の水位低下によってブロック群下流部で水面勾配が大きくなり、下流端のブロックの流失がきっかけとなって生じる。下流端ブロックの流失によって、直上流の水面勾配が大きくなるため、変形は上流に進行し、破壊に至る。このような変形・破壊過程を解析するためには、下流の水位低下とブロック群形状の変形に伴う流れ場とブロックに作用する流体力の変化を計算し、ブロックの移動限界を評価することが重要となる。本研究では、ブロックの安定性を評価するために、まずブロックに作用する流体力の評価法を検討し、ブロック群を有する流れの解析モデルを構築する。そして、護床ブロック群下流端の変形・破壊解析を行い、著者らの実験結果¹¹⁾と比較し、解析モデルの妥当性を検討することを目的とする。

2. 解析方法

(1) 護床ブロック群周りの流れの解析法

護床ブロック形状、配置を完全に取り込み、ブロック周りの局所的な流れ場が解ければ、護床ブロックに作用する流体力は厳密に評価できる。FAVOR法¹²⁾は、境界を含むコントロールボリューム(CV)において、流体の体積比率と流体が通過できる面積割合を考慮することによって、複雑な境界形状をもつ流れの解析を可能にしている。しかし、CV内における境界の形状は考慮されないため、ブロックの流体力を評価するためには、非常に小さいCVを要する。護床ブロック群は不規則な乱積みで配置されることがや護床ブロック及び突起形状が流れのスケールである水深等に対して非常に小さいことから、護床ブロック群の境界形状を厳密に評価する解析法は実用上有用なものとなり得ないと考えられる。本論文では個別のブロックの形状は評価せず、ブロック群全体の形状をブロックの占める体積密度で評価する。計算で直接考慮できない抵抗体を有する流れは、抵抗項や応力項の表現方法等の問題は残されているものの、基本的には運動方程式に抵抗項を付加することによって解析可能であることが明らかにされている^{8),13)}。しかし、ブロックの安定性を評価するためには、個別のブロックに作用する流体力がどのような仮定で表現され、流れの基礎方程式に組み込まれているかを明らかにする必要がある。ここでは、護床ブロックに作用する流体力を平均圧力分布と局所圧力分布によるものに分けて評価し、ブロック群を有する流れの基礎方程式を導き、抗力係数 C_D を用いた流体力の評価方法を検討する。

(a) 流れの基礎方程式

図-1のようにブロックに対して大きな $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域においてブロック群の流体力を評価する。解析は鉛直二次元とし、 Δy は水路幅である。 $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域のある一つのブロックに作用する x 方向流体力 D_x は、図-2のハッチした部分(対象とするブロックの x 方向断面積 a_{bx} の微小縦断距離 δx 間の変化量 Δa_{bx})に働く流体力 d_x を縦断積分すれば求まる。ここで、 D_x をグリッドスケールの平均圧力分布 $\bar{p}$ によるものとそれからの偏差 p' によるもの D_x' に分け、式(1)で表す。

$$D_x = \int_{\Delta x} \bar{p} \frac{\partial a_{bx}}{\partial x} dx + D_x' \quad (1)$$

ここに、 $\bar{p}$ は以下のように定義する。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \iiint_{\Delta x \Delta y \Delta z} \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz$$

$\Delta x \Delta y \Delta z$ 内のすべてのブロックに作用する流体力 nD_x は、式(1)に $\Delta x \Delta y \Delta z$ 内のブロックの個数 n を乗じて積分し、式(2)で表される。

$$nD_x = \left[\bar{p} A_{bx} \right]_x^{x+\Delta x} - \theta_b \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + nD_x' \quad (2)$$

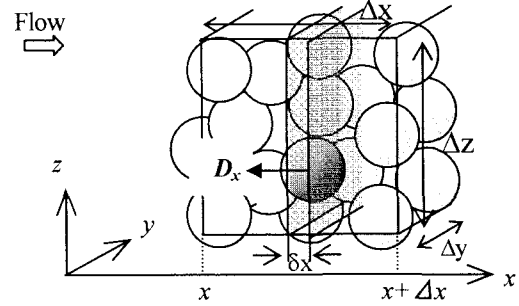


図-1 ブロック群を有する流れのコントロールボリューム

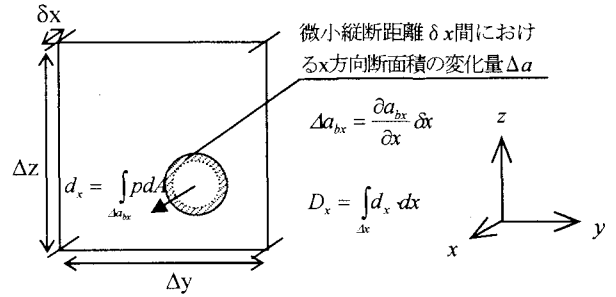


図-2 微小縦断距離 δx 間におけるブロックに作用する x 方向流体力 d_x

ここに、 A_{bx} は断面 x における x 方向のブロックの総面積、 θ_b は $\Delta x \Delta y \Delta z$ 領域内のブロックの占める体積密度である。 D_x' は抗力係数 C_D を用いて式(3)で表現する。

$$D_x' = \frac{1}{2} C_D \rho u_x U k^2 \quad (3)$$

ここに、 $\bar{u}_x$ はグリッドスケールの x 方向の実流速、 $U = \sqrt{u_j^2}$ 、 k はブロックの代表長さである。式(3)に n を乗じて変形すれば、式(4)が得られる。

$$F_x = \frac{nD_x'}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{C_D \rho \bar{u}_x U}{2k} \left(\frac{\theta_b}{\theta_{bo}} \right) \quad (4)$$

ここに、 $\theta_{bo} = V_{bo}/k^3$ 、 V_{bo} はブロック一個の体積であり、 n は $n = \theta_b / \theta_{bo}$ で与えられる。

一方、 $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域内の流体に x 方向の両境界面の圧力の差により作用する x 方向の力 $-P_x$ は、

$$-P_x = -\left[\bar{p} (A_{bx} - A_{bx}') \right]_x^{x+\Delta x}$$

と表される。式(2),(4)より、 $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域内の流体が圧力差とブロックから受ける x 方向の力の合計は、

$$-nD_x - P_x = \Delta x \Delta y \Delta z \left(F_x + (1 - \theta_b) \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \quad (5)$$

となる。 z 方向成分も同様である。 $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域内、 x_i 方向境界断面における流体占有率をそれぞれ V' 、 A'_i とし、境界における運動量輸送を表すと、式(5)を用いて $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域の空間平均場の基礎方程式(6),(7)が導かれる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial A'_i \bar{u}_i \bar{u}_j}{V' \partial x_j} = -g \delta_{zi} - \frac{F_i}{\rho V'} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial A'_i \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{V' \partial x_j} \quad (6)$$

$$\frac{\partial A'_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

ここに、 $x_1, x_3 = x, z$ 、 $\bar{u}_i$ はそれぞれグリッドスケール

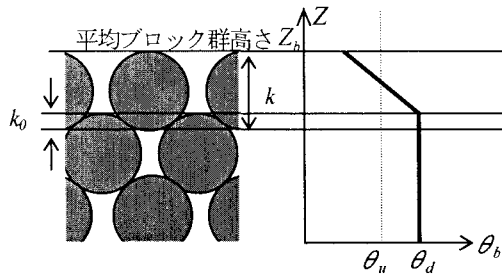


図-3 ブロック群配置の模式図と体積密度の鉛直分布の与え方

表-1 抗力係数 C_D 測定実験

	i_0	q (m ² /s)	dh/dx	Re ($=qk/h\nu$)	C_D
Case 1	1/329	0.0060	1/35.4	6.7×10^3	12.6
Case 2		0.0098	1/12.6	2.5×10^4	8.1
Case 3	1/104	0.0080	1/45.7	1.1×10^4	7.9
Case 4		0.0104	1/24.0	1.5×10^4	6.2
Case 5		0.0175	1/9.36	2.5×10^4	6.7

($\Delta x \Delta y \Delta z$)の x_i 方向の実流速, δ_{ij} はクロネッカーのデルタ, F_i は流体がブロック群から受ける x_i 方向流体力の $\Delta x \Delta y \Delta z$ の領域平均値である。また, u'_i は x_i 方向のサブグリッドスケールの実流速である。

サブグリッドスケールの流体混合は, 歪速度と渦粘性係数 ν_t を用いて式(8)で表す。

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = 2\nu_t S_{ij} \quad (8)$$

ブロックの抵抗による流体混合を表現するため, ν_t はスマゴリンスキー渦粘性モデル¹⁴⁾にブロック群の抵抗を評価し, 式(9)で与える。

$$\nu_t = (\Delta \cdot Cs)^2 \sqrt{2|S_{ij}|^2 + \frac{\overline{u_i F_i}}{\rho V' \nu_t}} \quad (9)$$

ここに,

Δ : フィルター幅(平均計算格子幅 $\sqrt{\Delta x \cdot \Delta z}$), Cs : スマゴリンスキー定数, である。 Cs は実験の流速分布から定める。

基礎方程式(6),(7)は護床工下流部の水面形状を適切に評価するため σ 座標系に変換して解く。 σ 座標系の定義及び計算法については, 既報の論文¹⁵⁾と同様であるのでここでは省略する。

(b) ブロック群の体積密度と抗力係数

ブロック群の体積密度を与えることによって, 基礎方程式(6),(7)でブロック群内外の流れを同時に解析することが出来る。ブロック群の体積密度は以下のように与える。ブロック群の上層では, 体積密度 θ_b は上下のブロックが噛み合わない分だけ小さくなる。そこで, 図-3のように上層の体積密度の平均値が噛み合わせのない場合の体積密度(式(10))となるように, ブロック群の体積密度 θ_b の鉛直分布を与える。

$$\theta_u = \theta_d (1 - k_0/k) \quad (10)$$

ここに, k_0 は上下のブロックが噛み合う厚さであり, $k_0/k = 0.4$ である。また, 平均ブロック群高さ Z_b を最上層に位置するブロック高の横断平均値と定義する。ブロッ

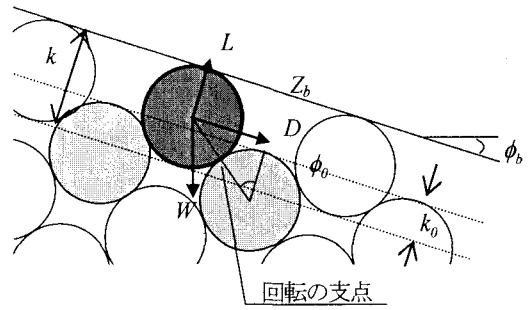


図-4 円形状を仮定した護床ブロックの釣り合い

クの設置方法やブロック群の変形過程において体積密度は一般に変化するが, 本論文では二層目より下の体積密度 θ_d を変形・破壊実験¹¹⁾における護床ブロック群密度の平均的な値 $\theta_d = 0.35$ で与える。ブロック群の平均高さが一層の場合よりも低い場合, ブロックの高さをブロック群の高さとしてブロック群密度を小さくして計算している。

抗力係数 C_D は実験により算出した値を用いる。本論文で対象とするブロック群を越流する流れにおいては, 流速とブロック群の体積密度が場所的に大きく変化する。このような流れ場において, 式(3)で定義される C_D を実験により求めることは困難であるため, ブロック群が非水没の場合, 即ちブロック群の体積密度が一定の条件でブロックの C_D を求める。(a)と同様の方法でブロック群内の流れの一次元運動方程式を導き, 一様密度を仮定して整理すると, C_D は式(11)で表される。

$$C_D = 2 \frac{\theta_{bo} k}{h} \frac{1 - \theta_b}{\theta_b} \left[\left(1 - \frac{1}{Fr'^2}\right) \frac{dh}{dx} + \frac{i_0}{Fr'^2} - \left(\frac{n}{h^{1/6}}\right)^2 \right] \quad (11)$$

ここに,

$$Fr' = \sqrt{gq^2 / (1 - \theta_b)^2 h^3}, \quad h: \text{水深}, \quad i_0: \text{河床勾配},$$

$n (=0.02)$: 底面粗度係数, q : 単位幅流量である。

変形・破壊実験と同じブロックを用い, 表-1に示す条件で実験を行い, 式(11)より C_D を求める。 C_D はブロック群によって減速している流速を代表流速としているため, 一様流中の C_D に比べ, 大きい。実験条件では, C_D は $Re > 10^4$ でほぼ一定となることから, 本論文では $C_D = 7.2$ を用いる。

(2) 護床ブロックの流体力の解析と移動限界判定法

護床ブロックに作用する流体力の計算法とブロックの移動限界判定法を検討する。式(2)において, 一様密度を仮定すると平均圧力勾配項(右辺第一項と第二項)が打ち消しあい, 流体力は形状抵抗成分のみとなる。これは, 流れの解析ではブロック群が体積密度で連続的に表現されているため, 平均圧力勾配による流体力がブロック群の内部応力のように扱われ, 単体ブロックの流体力が直接的に扱われないことを意味している。ブロック単体に作用する流体力を評価するためには, ブロック単体を切り離して(式(2)で右辺第一項=0)考える必要がある。後述

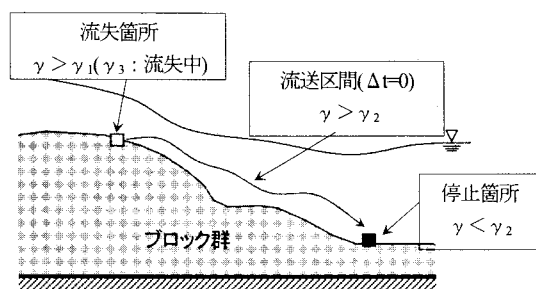


図-5 ブロック群の流失過程のモデル化

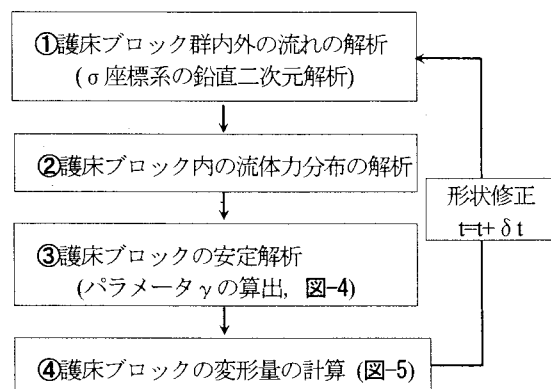


図-6 ブロック群の変形・破壊解析のフローの概略

するブロックの安定性の評価のため、単体ブロックの流体力ベクトルをブロックの水中重量で無次元化し、式(12)で表す。

$$f_{*i} = \frac{1}{sg\theta_{bo}} \left(-\frac{\theta_{bo}}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{C_D u_i}{2k} |U| \right) \quad (12)$$

ここに、 s : ブロックの水中比重であり、式(12)のブロック単体を含む領域($\Delta x = \Delta y = \Delta z = k$)の積分値はブロック一個に作用する無次元流体力ベクトル(式(13))である。

$$D_{*i} = \frac{D_i}{sgW} = \iiint_V f_{*i} dx dy dz \quad (13)$$

ここに、 W はブロック重量である。

式(12)を用いて、ブロックの釣り合い式を解き、ブロックの移動限界を判定する。ブロックの初期運動であるモーメントによる回転運動¹¹⁾について、横断方向(奥行き方向)に形状が一様と仮定した円形物体(図-4)を考える。流体力による駆動モーメントと重力による抵抗モーメントの比 γ (以下、安定パラメータと呼ぶ)は式(14)で表現される。

$$\gamma = \frac{\beta_D D_* + \beta_L \tan \phi_0 L_*}{\tan \phi_0 \cos \phi_b - \sin \phi_b} \quad (14)$$

ここに、 $\gamma < 1$ でブロックは安定であり、 $\cos \phi_0 = 1 - C(k_0/k)$ 、

$$\beta_D = 1 + \alpha_D / \cos \phi_0, \quad \beta_L = 1 - \alpha_L / \sin \phi_0,$$

$$D_* = D_{*x} \cos \phi + D_{*y} \sin \phi, \quad L_* = D_{*x} \sin \phi + D_{*y} \cos \phi$$

である。 α_D, α_L は D, L の作用点の図心からのずれを表す係数であるが、解析では、流体力による回転モーメント

は、式(13)と同様に最上層ブロックに相当する厚さ $k/\cos \phi_b$ で積分して計算し、作用点のずれ(α_D, α_L)は直接考慮されている。式(14)から、ブロックの移動に対する抵抗力はブロックの無次元噛み合わせ厚さ k_0/k と C に支配される。 C は護床ブロックの突起形状及び三次元的な形状と回転方向を考慮するための係数であり、 C を適切に評価することによって式(14)が護床ブロックに適用できることが実験により示されている¹¹⁾。 $C=1.0$ は、式(14)は突起形状の無い円形物体の場合であるため、ブロックの突起形状の噛み合わない場合で移動しやすい極値を表し、実験で生じたブロックの移動限界を安全側に評価できる。解析では、実験により得られたブロックの突起形状が平均的に噛み合う場合の値 $C=1.6$ を用いる。ブロック群高さが一層の場合のよりも低い場合、平坦河床上のブロックの移動限界勾配から求めた $\tan \phi_0 = 0.47$ を与えている。

(3) 護床ブロック群の変形量の計算

護床ブロックの変形・破壊を厳密に記述しようとすれば、個別のブロックの運動を解析する必要がある。近年、個別の粒子の運動を記述できる解析法¹⁶⁾が捨石防波堤の変形解析¹⁷⁾や流砂運動の解析¹⁸⁾などに適用されるようになってきている。護床ブロックにおいては、流失したブロックよりも、流失せずに残されたブロック群の護床工としての機能が重要となる。また、ブロック群の変形、破壊は、ブロックの流失と安定した形状が繰り返されながら生じるため、多量のブロックの流失が生じない限り各場所のブロックの移動限界が評価できれば工学的に十分な意味を持つと考えられる。このため、護床ブロック群においては必ずしも多量のブロックが流失する完全な破壊現象まで解く必要は無いと考え、護床ブロック群の安定性を評価することに主眼を置き、静的な安定解析に基づいた簡易的な変形・破壊の解析モデルを構築する。

図-5に示すように、移動の開始、停止の判定基準をそれぞれ γ_1, γ_2 とし、ブロックは $\gamma_1 < \gamma$ の箇所から $\gamma < \gamma_2$ となる箇所まで輸送されるとする。また、ブロックの流失が終わるかどうかの判定基準 γ_3 を定義する。ブロックの輸送は dt の間に微少量(Δh_b)ずつ流失するとしている。実験においてブロック一個の流失時間は0.5秒程度であったため、 $\Delta h_b = 2L_{b0}dt$ としている。 $\gamma_1 \sim \gamma_3$ について考察する。 γ_1 はブロックの移動限界を表すため、 $\gamma_1 = 1.0$ である。 γ_2 は式(14)の駆動力にブロックの慣性力が付加されることを意味しているため、本来ならブロックの運動方程式によって定められるものである。 γ_3 は、周囲のブロックの移動に伴う局所的な圧力変動によって、式(14)の駆動力となる流体力の増加を表す。即ち、 γ_2 と γ_3 はそれぞれ、ブロックの減速、加速運動に強く関係しており、式(14)で表現する場合、いずれも1以下となることから、ここでは $\gamma_2 = \gamma_3 = 0.5$ を与えてブロック群の変形・破壊解析を試みる。解析フローは図-6に示す通りである。

表-2 実験水路とブロックの諸元¹¹⁾

実験流量	$7.5 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s)}$
水路幅	0.45 (m)
水路長	10.0 (m)
ブロックの代表長さ k	$9.1 \times 10^{-2} \text{ (m)}$
ブロックの体積 V_b	$2.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3)$
ブロックの比重	2.3

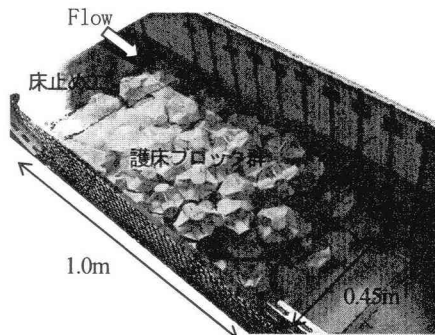


写真-1 護床ブロック群の配置の様子¹¹⁾

3. 解析結果と実験結果の比較

(1) 実験概要と計算条件

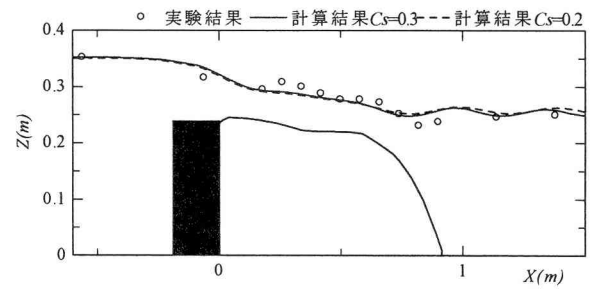
計算対象は内田・福岡らの護床ブロック群破壊実験¹¹⁾である。表-2に実験条件を示す。写真-1に示すように高さ $h_b=0.24\text{m}$ の床止め工の下流にブロック群が乱積みで設置され、流量一定で下流端水位 $h_0(X=3.0\text{m})$ を低下させ、ブロック群の変形・破壊機構とブロックの移動限界が検討されている。

計算の境界条件として、水路上流端で流量、下流端で水深を与えている。底面境界条件として対数則を用いている。また、実験では床止め工は煉瓦を積み重ねて作成されているため、床止め工の高さは与えられているが、形状は不明である。このため、床止め工の上流($X=-0.6\text{m}$)の水位が実験値と一致するように、床止め工の上流側の形状を与えている。

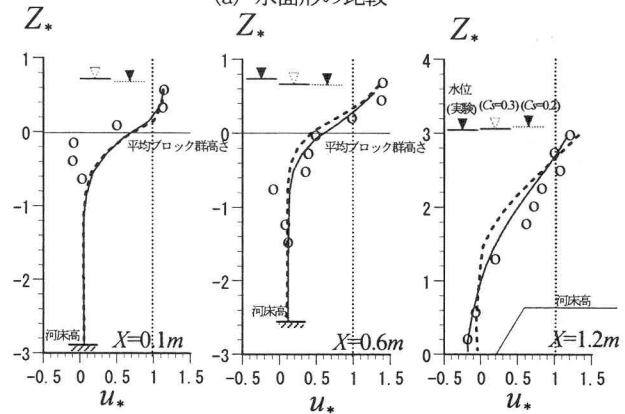
(2) 流れの解析モデルの検証

設置時のブロック群形状を初期状態とし、この流れ場について、計算結果と実験結果と比較し、解析モデルの妥当性を検討する。また、スマゴリンスキー定数 C_s を $C_s=0.2, 0.3$ について、比較、検討する。

図-7はブロック群設置時の形状における(a)水面形と(b)鉛直主流速分布の比較である。床止め工直下では、水面勾配が大きく、ブロック群上面に流れが衝突し、その直下で水位が上昇する。運動量交換はブロック群上層のみで活発に生じており、ブロック群下層部ではほとんど流れが生じていない。ブロック群上では限界流速よりも大きい射流状態で流れ、この流れはブロック群下流で波状跳水を形成し、エネルギーを損失させている。実験でも波状跳水は観察されている¹¹⁾が、計算は鉛直二次元であるため、波状の水面が顕著に現れる。なお、跳水の



(a) 水面形の比較



$$Z_* = (Z - Z_b) / h_c, \quad u_* = u / \sqrt{gh_c}, \quad h_c: \text{限界水深}(0.083\text{m})$$

(b) 流速鉛直分布の比較

図-7 ブロック群設置形状における流れ場の解析値と実験値¹¹⁾の比較

形態として条件的には生じ得る潜り跳水は、実験、計算共に生じていない。これは、ブロック群の下流では空隙が大きいためと考えられる。計算結果はブロック群衝突後の水面の跳ね上がりが小さいなど、床止め工直下の流れの再現性はあまり高くない。これは、ひとつには $X=0.1$ の鉛直流速分布から与えた床止め工形状や上流部のブロック群高さなどの設定条件の問題である。しかし、本質的にはブロック群を平均的に表した本解析モデルでは、護床ブロック群に衝突するような激しい流れにおけるブロックの抵抗やそれによる乱れを表すことは難しいと考えられる。一方、その下流においては、ブロック群下流で水面勾配が大きくなりブロック群上層に速い流れが生じる点や、下流下層で逆流域が生じる点など、ブロック群の変形・破壊現象を支配する下流部の流況について計算結果はほぼ説明できていると言える。 $C_s=0.3$ と $C_s=0.2$ の鉛直流速分布を比較すると、床止め工から下流の断面ほど計算結果の違いが現れ、 $C_s=0.3$ の計算結果の方が $C_s=0.2$ と比べて実験結果の流速鉛直分布を表している。以下の解析では、 $C_s=0.3$ を用いている。

(3) 変形・破壊解析と実験結果の比較

実験の変形・破壊形状と比較し、解析モデルの再現性を検討する。図-8は、護床ブロック群の変形・破壊過程の実験結果と実験において護床ブロック群の変形・破壊形状が生じた下流端水深の範囲の計算結果を示している。計算結果は水位低下によって護床ブロック群の下流端が

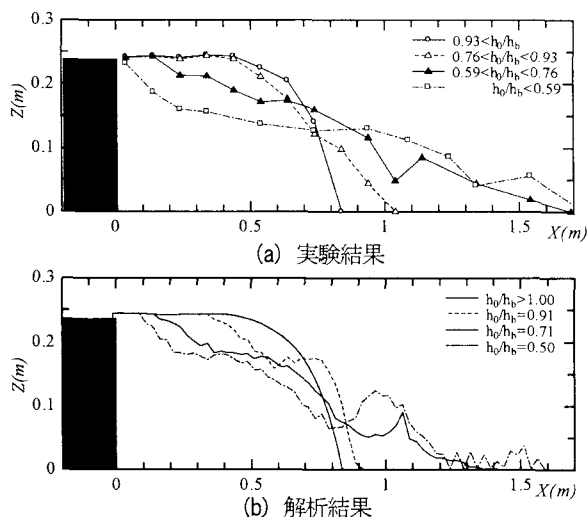


図-8 下流水位低下によるブロック群の変形・破壊過程の実験結果と解析結果の比較

ら変形し、破壊に至るまでの実験結果の過程を説明できているが、ブロック群の変形が進行するに従い、実験結果に比べて変形量が小さくなる。これは、変形が進行するほど、体積密度が減少するなどのブロック群の配置条件が変化することと、下流水位が低下するほど一回の破壊で多量のブロックが流失するようになることが主な原因と考えられる。しかし、変形量が少ない段階においては、ブロック群形状は概ね再現されている。このため、解析モデルは破壊機構を定量的に評価するには今なお課題があるが、ブロック群が変形し、破壊に至るまでの工学上重要と考えられるブロックの変形範囲についての実験結果を再現できていると言える。

変形・破壊モデルに用いた判定基準 γ_2 , γ_3 については、検討が十分でない。本解析条件では、ブロック群下流で γ が急激に低下するため、 γ_2 は解析結果にほとんど影響を与えないが、 γ_3 はブロックの流失量を支配するため、変形が進行するにつれて、その影響は解析結果に強く現れる。即ち、変形量が大きくなるほど、一定の γ_3 では表現できなくなる。このためには、ブロックの運動が周囲の流れ場に及ぼす影響を明らかにし、力学的、水理学的評価に基づいて γ_3 を評価する必要がある。しかし、 γ_3 にはブロック群を連続体として仮定した影響も含まれているため、一般性の高い評価は困難と考えられる。このため、連続体モデルでブロック群の大規模な変形、破壊を表現するには限界があると言える。

4. 結論

以下に、本論文で得られた主要な結論を示す。

- 1) 複雑な境界形状を有する護床ブロック群の安定性を評価するために、護床ブロック群の体積密度と形状抵抗を含む形で流れの基礎方程式を導き、実験により得られた C_D を用いてブロックの流体力を評価できる解析モデルを構築した。また、ブロックの流体力と

重力によるブロックの回転モーメントの比 γ を用いた簡易的な護床ブロック群下流端の変形・破壊解析モデルを構築した。

- 2) 流れの解析結果は、護床ブロック群を有する実験結果の流れ場の特徴を説明でき、水面形、鉛直流速分布を再現できることを明らかにした。
- 3) 護床ブロック群の変形・破壊の解析では、ブロック群が変形し、破壊に至るまでの機構を説明できる。また、解析モデルは工学上重要と考えられるブロックの流失量が少ない段階のブロックの変形について実験結果を再現できることを明らかにした。

参考文献

- 1) (財)国土開発技術研究センター：床止めの構造設計手引き，山海堂，1998。
- 2) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸法覆工の水理特性に関する研究，土木技術資料，第30巻，第3号，pp.3-8，1988。
- 3) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸工の水理設計法，土木技術資料，第30巻，第3号，pp.9-14，1988。
- 4) 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 No.551，pp.21-36，1996。
- 5) G. J. C. M. Hoffmans and R. Booij: Two-Dimensional Mathematical modelling of Local-Scour Holes, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.31, No.5, pp.615-634, 1993。
- 6) 前野詩朗，山縣正明，里本公明：護床工からの土砂の抜け出しに及ぼす変動水圧の影響に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.409-414，2001。
- 7) 内田龍彦，福岡捷二，盧庚範，土井豆政廣，山縣勝巳：根固め工の変形・滑り破壊に関する研究，河川技術論文集，第10巻，pp.231-236，2004。
- 8) 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，No.691，pp.93-103，2001。
- 9) 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。
- 10) 川口広司，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。
- 11) 内田龍彦，田中幸志，福岡捷二：護床工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験，水工学論文集，第48巻(1)，pp.841-846，2004。
- 12) Hirt, C. W.: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, Journal of Wind engineering, No.52, pp.333-344, 1992。
- 13) 例えば，榊山勉，安部宣行，鹿島遼一：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第37巻，pp.554-558，1990。
- 14) 数値流体力学編集委員会：乱流解析 数値流体力学シリーズ3，東京大学出版会，1995。
- 15) 内田龍彦，福岡捷二，渡邊明英：床止め工下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発，土木学会論文集，No.768，pp.45-54，2004。
- 16) 木山英朗，藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，pp.137-146，1983。
- 17) 荒木進歩，出口一郎：捨石防波堤の断面変形に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.531-535，1997。
- 18) 後藤仁志，A. Yeganeh-Bakhtiry，酒井哲郎：混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析，土木学会論文集，No. 649/II-51，pp. 17-25，2000。

(2004.9.30 受付)