

# 軟岩河床における根固ブロックの 安定性に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY OF RIVERBED PROTECTION BLOCK ON SOFT BEDROCK

井上 卓也<sup>1</sup>・阿部 孝章<sup>1</sup>・村上 泰啓<sup>2</sup>

Takuya INOUE, Takaaki ABE and Yasuhiro MURAKAMI

<sup>1</sup>寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: inoue-t@ceri.go.jp / abe-t@ceri.go.jp

<sup>2</sup>北海道開発局旭川開発建設部 名寄河川事務所 (〒096-0016 名寄市西6条南9丁目)

E-mail: murakami-y22ah@hkd.mlit.go.jp

**Key Words:** *bed protective works, soft bedrock, hydrodynamic force*

### 1. はじめに

石狩川上流, 網走川, 久著呂川など北海道内の複数の山地河川において, 軟岩河床上の砂礫が流出し, 急激な河床低下・河岸浸食が進行している. これにより, 護岸や橋脚などの安定性が低下し, それに伴い治水安全度の低下が懸念されている.

北海道に広く分布する堆積性軟岩は, 浸食に対して脆弱である. 一度浸食が始まると, 流水や流砂が浸食箇所集中し, 筋状の局所洗掘を形成する特徴を持つ (図-1).

砂礫河床において, 浸食箇所の勾配は, 砂礫の水中安息角程度となる. しかし, 軟岩河床はある程度の自立性を持つため, 砂礫の水中安息角を上回る浸食勾配になる場合がある. また, 軟岩河床の表面粗度は砂礫河床より小さい<sup>1)</sup>. このため, 軟岩河床上に設置された根固工は, 砂礫河床上に比べ安定性を保ちにくい可能性がある (図-2).

軟岩河床の低下を抑制する対策として, 川幅を広げることにより, 掃流力を低下させ, 洗掘を防止する方法が考えられる. しかし, 拡幅は堤防位置や周辺土地利用により制約されるため, 簡単に実施することはできない. 拡幅をせずに洗掘を防止する方法として, 帯工や床止工が考えられる. このため, 軟岩河床上の根固ブロックの安定性・屈とう性に関す



図-1 網走川における軟岩河床の筋状浸食



図-2 久著呂川における根固ブロックの状態

る知見が求められている。

根固ブロックの安定性に関する既往研究として、福岡ら<sup>2)3)</sup>、田村ら<sup>4)</sup>、内田ら<sup>5)6)</sup>の研究が挙げられる。福岡らは、根固ブロックに作用する流体力を評価し、ブロック形状と流速低減効果とブロックの力学的安定性を示し、現在の護岸の設計法<sup>7)</sup>の基盤となる考え方を提案している。田村らは、多種多様なブロック形状について、抗力係数と揚力係数を計測し、その特性を整理している。内田らは、床止工下流護床ブロック群の変形・破壊機構を実験より調べ、これを基に、ブロックに作用する流体力の評価方法と流れの解析モデルを提案している。

しかし、上述の研究は砂礫河床を対象とした研究であり、軟岩河床を対象とした研究は行われていない。また、分力計により根固ブロックの抗力と揚力を計測し、安定性を検討した研究例<sup>4)8)</sup>はあるものの、流れ場との関係から安定性を検討した例は少ない。

そこで、本研究では、軟岩河床における根固ブロックの安定性を把握することを目的に、固定床上における根固ブロックの移動限界、抗力、揚力と流れ場の計測を行い、ブロック上部で発生する流況と安定性の関係について検討を行った。

## 2. 根固ブロック安定性実験

### (1) 施設概要

本実験で用いる根固ブロックの側面低部は斜めにカットされている。これにより、屈とうした際にブロック同士の噛み合いが良くなり、軟岩河床の局所洗掘へブロックが追従しやすくなる。模型縮尺は実物の 1/12 である(図-3)。実験水路は、全長 25m、幅 1m、勾配 1/289 の直線水路である。流量はフルード則を用いて石狩川上流の計画洪水流量相当に設定した。実験水路は、軟岩が露出している石狩川上流と換算粗度が同じになるよう、栈粗度を設置した。

### (2) 移動限界の測定方法

ブロックを単体および群体で固定床上(軟岩とみなした)に設置し、水深をブロック高の 5 倍程度ある 0.2m から計画高水相当である 0.65m まで 0.05m ずつ連続的に増加させてブロックの移動限界と移動形態を観測した。

図-3 にブロックの配置方法を示す。単体ブロックは連結せず 3 つを水路床に設置した。群体ブロックは、市販の S フックで連結し、流下方向に 3 列と 5 列の 2 パターンを設置した。本実験では、ブロックが 0.5m 移動したときの水深を移動限界とした。

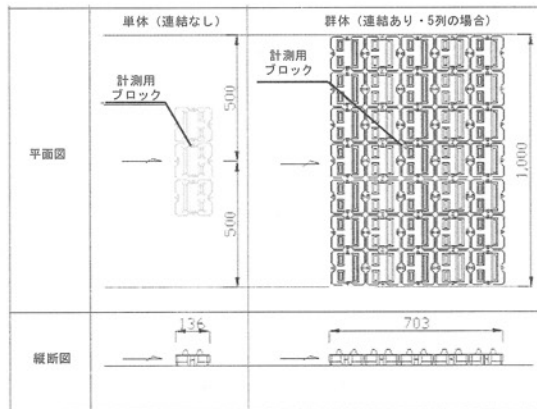
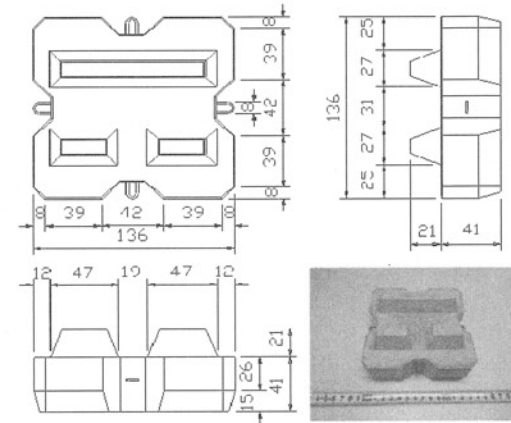


図-3 根固めブロックの模型サイズと配置方法

### (3) 効力・揚力係数・相当粗度の算定方法<sup>9)</sup>

ブロックの安定性については、三分力計(LMC-3502-100NWP、日章電機株式会社)を用いて抗力及び揚力を計測することにより算定した。分力計を接続した計測用ブロックは、単体および群体(5列)の中央部に設置した。分力計からの出力データは変動が激しいため、1分間サンプリングを行い、その平均値をその点の代表として採用した。なお、計測中に大きな変動を記録した場合は、一様な計測値が得られるまで再度計測した。

抗力係数、揚力係数、相当粗度を算定するためにはブロック近傍流速が必要である。流速は、ブロック面から水面まで水深の 10% 間隔で 10 点、横断方向に 10 点、3 断面で電磁流速計を用いて測定した。

本実験における抗力係数および揚力係数は次の式によって求めた：

$$C_D = \frac{2D}{\rho A_d V_d^2} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho A_d V_d^2} \quad (2)$$

ただし、 $C_D$  は効力係数、 $D$  は抗力の計測値[N]、 $C_L$  は揚力係数、 $L$  は揚力の計測値[N]、 $A_d$  は効力の作用面積(流れに対するブロックの投影面積) [ $m^2$ ]、 $V_d$

はブロック近傍の流速[m/s]である。

また、相当粗度  $k_s$  は摩擦速度  $u_*$  を群体ブロックに作用する抗力から求め、その値を平均流速公式に代入して求めた：

$$k_s = \frac{H_d}{10(V_m/u_* - 6.0)^{5.75}} \quad (3)$$

ただし、 $V_m$  はブロック近傍で計測した鉛直流速分布の平均値[m/s]、 $u_*$  は摩擦速度、 $H_d$  は水深である。 $u_*$  は計測した抗力を用いて、

$$u_* = \sqrt{D/(\rho A_c)} \quad (4)$$

より求めた。レイノルズ数は次式により算出した。

$$Re = \frac{V_d L}{\nu} \quad (5)$$

ただし、 $L$  はブロック高、 $\nu$  は水の動粘性係数で  $1.146 \times 10^{-6}$  (水温 15°C) [m<sup>2</sup>/s]とした。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 移動限界

ブロックを単体で設置した場合、水深 0.2m では移動しなかった。その後水深を増やし、水深が 0.4m に達するとブロックは 0.5m 下流まで滑動した(図-4)。

ブロックを群体(3列)で設置した場合、水深 0.45m まではブロックは停止したままであったが、水深を 0.5m へ上昇させて約 2 分後に右岸側のブロックがめくれ上がるように浮上しそのまま群体ブロックが下流へ流出した(図-5)。

ブロックを群体(5列)で設置した場合、実験水路の許容水深である 0.65 m まで水深を上昇させたが、移動することなく実験は終了した。

ブロック群体(3列)の場合、めくれ流出を起こした理由として、群体全体のブロック重量が大きくなったため滑動しにくくなったことが挙げられる。また、本実験で用いた根固ブロックは、屈とう性を高めるために側面低部がカットされており、ブロック下面に水が流れ込み易い。これにより、ブロックを押し上げる力が働いたことも、めくれ流出の原因と考えられる。

軟岩河床では、砂礫河床に比べ浸食箇所が急勾配になる。このため、根固ブロックは、高い屈とう性が求められる。軟岩河床に根固ブロックを設置する場合、安定性と屈とう性の両立が重要となる。

#### (2) 抗力係数・揚力係数

単体ブロックではブロック高(0.062 m)を代表長

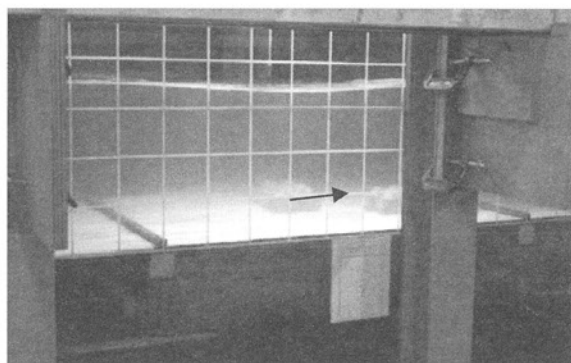


図-4 ブロックの移動(単体実験)

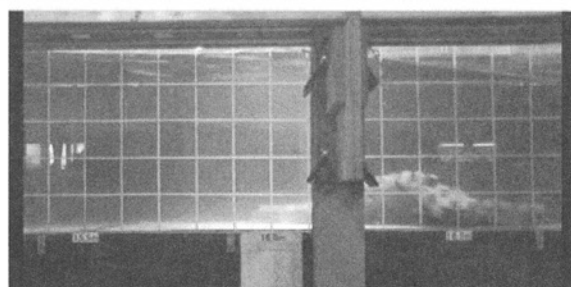
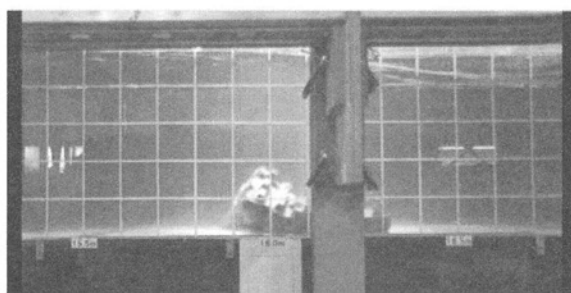


図-5 ブロックの移動(群体実験3列)

に選択してレイノルズ数を求めた。この結果、レイノルズ数は約 45,000~65,000 の範囲となった。抗力係数  $C_D$  および揚力係数  $C_L$  とレイノルズ数の関係(図-6)をみると、レイノルズ数に対してほぼ一定の傾向となった。この傾向は、既往研究<sup>4)8)</sup>でも確認されている。

群体ブロックではブロックの突起高(0.021 m)を代表長としてレイノルズ数を求めた。この結果、レイノルズ数は約 22,000~23,000 の範囲となった。抗力係数及び揚力係数とレイノルズ数の関係(図-7)をみると、抗力係数  $C_D$  についてはレイノルズ数に対して負の相関が、揚力係数  $C_L$  についてはレイノルズ数に対して正の相関がみられた。

既往研究<sup>4)</sup>によると、抗力係数はレイノルズ数が 10,000~40,000 程度までは小さくなる傾向を示し、50,000 を超えるとほぼ一定の傾向を示しており、本実験も同様の傾向と考えられる。一方、揚力係数は、既往研究<sup>4)</sup>においてレイノルズ数に対してほぼ一定の傾向を示しており、本実験と異なる傾向となっ

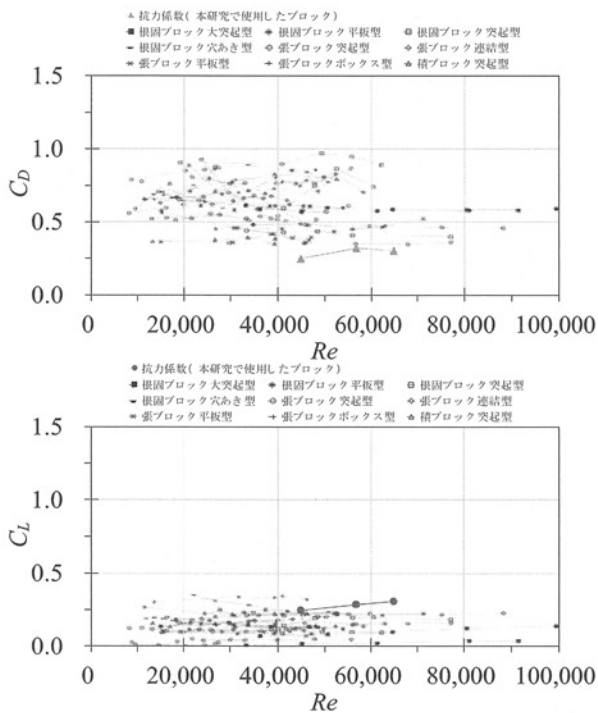


図-6 レイノルズ数と  $C_D$ ,  $C_L$  の関係 (単体実験)

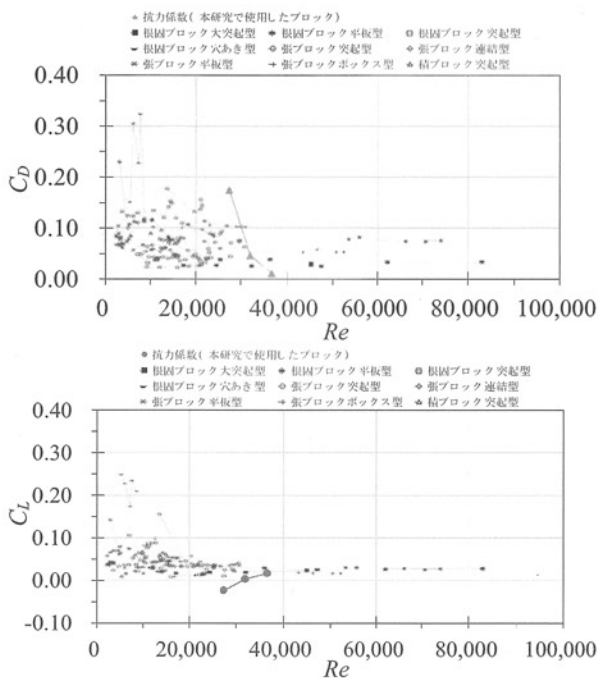


図-7 レイノルズ数と  $C_D$ ,  $C_L$  の関係 (群体実験)

ている。また、本実験では、水深の小さいケースにおいて、揚力係数が負の値となった。揚力係数の変動特性については、流れ場の状況と併せて後述する。

### (3) 相当粗度

図-8 に群体実験における相当粗度とレイノルズ数の関係を示す。

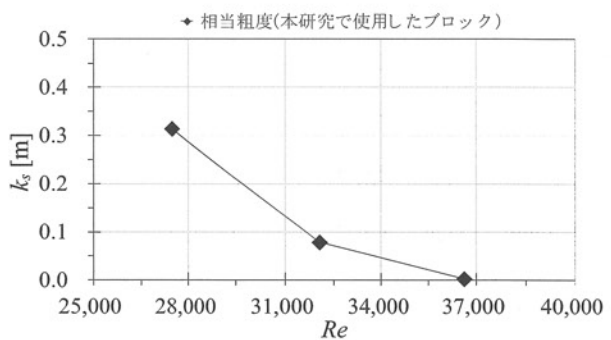


図-8 レイノルズ数と相当粗度の関係 (群体実験)

これによると、レイノルズ数と相当粗度には負の相関がみられた。既往研究<sup>8)</sup>によると、相当粗度は、レイノルズ数が 10,000~40,000 程度までは小さくなり、40,000 を超えるとはほぼ一定の傾向を示しており、本実験も同様の傾向と考えられる。

### (4) 流れ場の検討

本節では、水路縦断方向の 3 地点において、高密度に計測した流れ場から、抗力係数および揚力係数の傾向について考察を行う。

図-9 に単体実験時のブロック周辺の 3 次元流況を示す。図のコンターは流速の絶対値を示しており、ベクトルは流向を示している。これによると、流速の速い部分はブロックを避けるように流れている。また、3 断面間で流速場は大きくは変化していない。水深  $h=0.25\text{m}$  のケースにおいて、下向きの流速が発生しているが、ブロックの直上流のみであり、ブロックを乗り越える流れによって形成されていると推定される。

図-10 に単体実験時の水面状況を示す。これによると、単体実験時において水面形状の大きな変化はみられない。

図-11 に群体実験時のブロック周辺の 3 次元流況を示す。水深  $h=0.25\text{m}$  のケースでは中央の断面（ブロック位置）において下向きの高流速が発生している。単体ブロックの場合と比較すると、横断方向に一樣に下向きの流速が発生している。水深  $h=0.45\text{m}$  のケースでは、中央の断面（ブロック位置）およびその下流の断面で流速が大きく、これらの断面では下向きの流速が発生している。一方、水深  $h=0.65\text{m}$  のケースでは、中央の断面（ブロック位置）で流速が大きくなっているものの、下向きの流速はあまり発生していない。

図-12 に群体実験時の水面状況を示す。これによると、水深  $h=0.25\text{m}$ 、水深  $h=0.45\text{m}$  のケースでは、

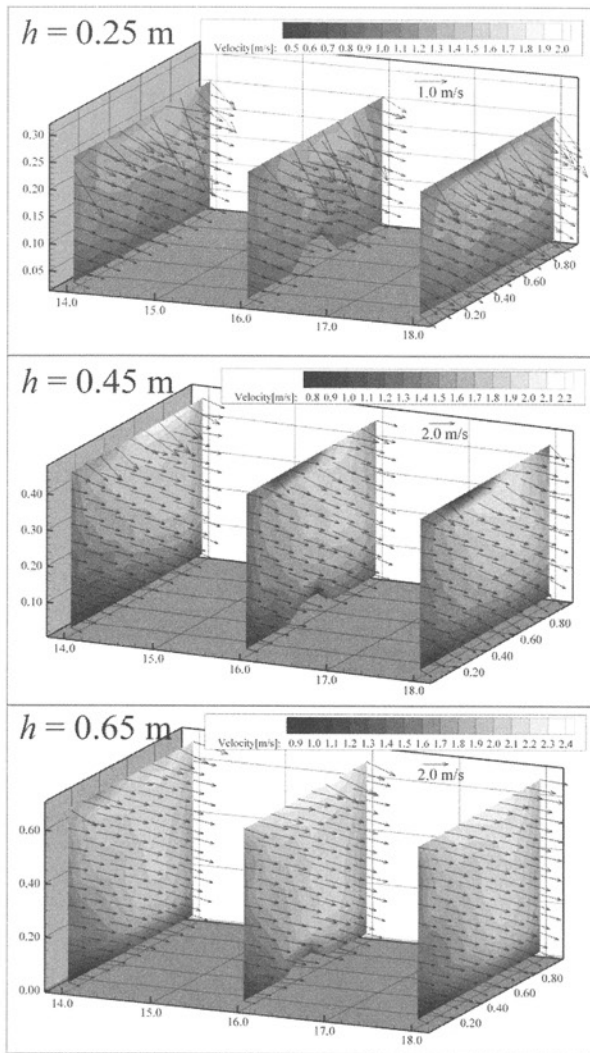


図-9 ブロック周辺の流況（単体実験）

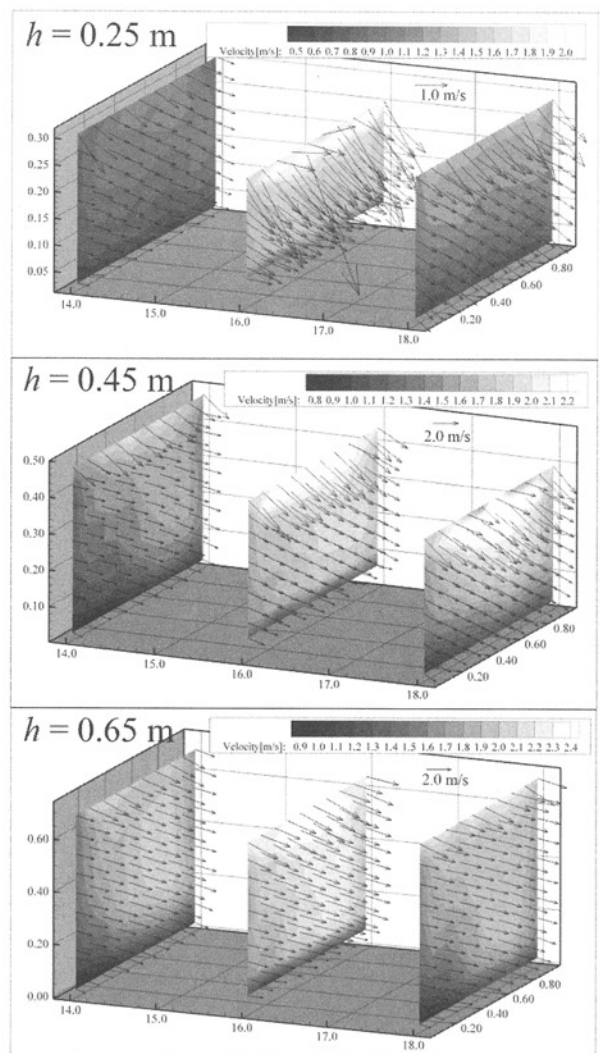


図-11 ブロック周辺の流況（群体実験）

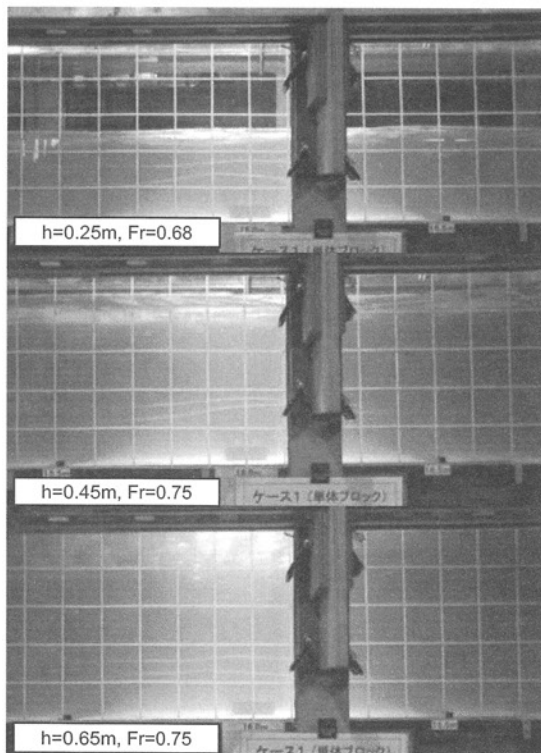


図-10 ブロック周辺の水面状況（単体実験）

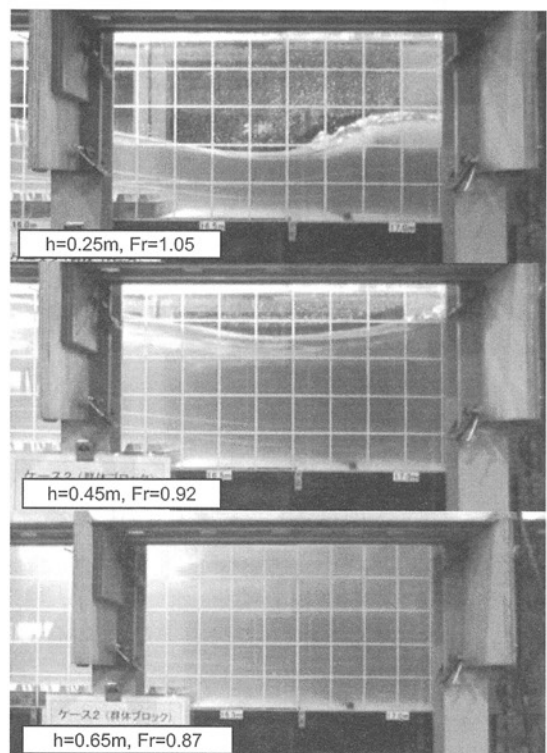


図-12 ブロック周辺の水面状況（群体実験）

群体ブロック上流側の水位が堰上がり、その影響によりブロック上部の水面勾配が急になり、ブロック下流において跳水が発生している。一方、水深  $h=0.65$  m のケースは、水深が大きいため、群体ブロックによる堰上がり効果は少なく、跳水現象も発生していない。

以上のことから、群体実験の水深  $h=0.25$  m のときに、揚力係数が負の値を持った（図-7 参照）理由として、ブロックによる堰上げにより、下向きの流速が発生し、ブロックを底面に押し付ける力が強く働いたためと推測される。また、揚力係数が正の相関をとった理由として、水深の上昇に伴い、ブロックによる堰上げ効果が薄れ、下向きの流速が弱まったためと推測される。

群体ブロック設置時に、堰上げが発生した理由として、軟岩河床を模した今回の水路床の粗度が、群体ブロックの粗度より低いことが理由として考えられる。

一方、単体ブロックでは、堰上げがほとんど発生しなかったため、揚力係数は一定値となったと推測される。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、分力計による抗力・揚力の計測と 3 次元流速計による高密度観測によって、ブロックに作用する抗力・揚力係数を、流況観察と併せて考察した。以下に、本研究で得られた知見と今後の課題を示した。

- a) 単体ブロックの移動開始状態は滑動であったが、群体ブロックの移動開始状態はめくれによるものであった。軟岩河床では、砂礫河床に比べ浸食箇所が急勾配になる。このため、根固ブロックは、高い屈とう性が求められる。しかし、屈とう性を高めるために側面低部をカットすると、めくれ流出の危険性が増す可能性があることが実験より示唆された。
- b) 単体ブロックの抗力係数、揚力係数は既往実験と同じ傾向を示した。一方、群体ブロックでは、抗力係数、相当粗度は既往実験と同じ傾向を示したが、揚力係数は異なる傾向を示した。既往実験において、揚力係数はレイノルズ数に依らず概ね一定だが、本実験において、揚力係数はレイノルズ数と正の相関を示した。
- c) 群体ブロック設置時に、ブロック上流側の水位が

堰上げられ、その影響によりブロック上の水面勾配が急になり、下向きの流速が発生した。この下向き流速は、水深の増加とともに弱まり、結果として、揚力係数がレイノルズ数と正の相関は示したと推測される。

- d) 本研究により、軟岩河床に根固ブロックを設置した場合の安定性について、基礎資料を得ることができた。しかし、実際の軟岩河床は、流水や流砂により浸食される。根固ブロック周辺は、複雑な流れ場となるため、局所的な浸食が進行する可能性が高い。今後、軟岩の浸食形状と根固ブロックの安定性について、研究を実施していく必要がある。

謝辞：本研究の水理実験に際しては、株式会社水工リサーチの関係各位にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 井上卓也，泉典洋，米元光明，旭一岳：軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験，河川技術論文集，第 17 巻，pp.77-82，2011.
- 2) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸工覆工の水理特性に関する研究，土木技術資料30-3，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30-3，pp.9-14，1988.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 内田龍彦，福岡捷二：流れによる護床ブロック群の変形・破壊の解析，水工学論文集，第49巻，pp.793-798，2005.
- 7) 護岸の力学設計法，(財)国土開発技術研究センター，山海道，1998.
- 8) 山本晃一，林建二郎，関根正人，藤田光一，田村正秀，浜口憲一郎：護岸ブロックの形状と抗力・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.
- 9) 財団法人土木研究センター：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル（第2版），財団法人土木研究センター，34-37，2003.

(2012. 5. 9 受付)