

洪水の流水中にブロックを投入した際の 転動しやすさに関する水理実験と力学的考察

HYDRAULIC EXPERIMENTS AND DYNAMIC CONSIDERATION ON EASE OF
ROLL AT THROWING A BLOCK INTO FLOOD WATER

山本太郎¹・東海林勉²・土屋大輔³・伊藤幸義³・川邊和人⁴・島田友典⁴
Taro YAMAMOTO, Tsutomu TOUKAIRIN, Daisuke TSUCHIYA, Yuki Yoshi ITO,
Kazuhiro KAWABE and Tomonori SHIMADA

¹正会員 博(工) 一般財団法人北海道河川財団(〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1)

²正会員 一般財団法人北海道河川財団(〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1)

³正会員 株式会社建設技術研究所東京本社水理センター(〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

⁴非会員 北海道開発局帯広開発建設部帯広河川事務所(〒089-0536 北海道中川郡幕別町札内西町73-6)

It is known among practicing river engineers that a block rolls down easily when it is dropped into flood water. Originally, block to be used in the river has not been made in the assumption that it will be put into running water, it is designed with the assumption that it does not move in the installation. The reason of why when a block is put into running water, the block rolls easily is not clear. For this reason, the hydraulic experiments supposing the situations of dropping and stillness was conducted to the blocks of some kinds of leg shape. And it was verified whether it would be easier to rotate a block than the time of setting on bed when the block was dropped into water. Furthermore, it was considered from the dynamic model why it would be easier to rotate a block than the time of setting on bed at the time of dropping into water.

Key Words : *revetment block, hydraulic experiment, rolling, drag coefficient, dynamical model*

1. はじめに

洪水時に破堤の危険性が生じたり河岸侵食が進行した場合に緊急対応として流水中にコンクリートブロックを投入して被害進行を抑制することがある。しかしながら洪水の激流の中にブロックを投入してもブロックが流れのなかで転がって想定通りの場所にとどまりにくいとの現場からの指摘がある。災害時には予め備蓄されているブロックが使用されるが備蓄ブロックは消波工や護岸の根固めに使用される種類のもが多く、これらのブロックはそもそも据え付けて使用することを想定されていて、流水中に投入して使用することを想定してつくられていない。現在、河川の護岸や根固めで使用されるブロックは、護岸の力学設計法¹⁾に示される手順で安定性を検討しブロック規模が設計されるが、基本的な考えとして護岸も根固めも静的な状態において流水の外力が作用したときに安定性を保てるかが判断基準となり、流水中への投入のような動的な状態を前提とした考え方はない。災

害時の緊急工法として護岸・根固め用のブロックの活用が不可欠であり²⁾、さらに堤防が破堤した時のせめ工や締切工などに備蓄ブロックを使用することを想定するならば、備蓄ブロックは洪水の流水中に投入することをひとつの前提として、その状況に適合するようなブロックであることが必要となる。このような背景から、まずは基礎的な知見としてブロックが現場技術者の経験で言われるような、流れの中にブロックを投入しても転がりやすいというのはどういうことなのか、投入時と据え付け時にブロックの挙動がどう違うのか、水理実験と力学的な考察により検証した。

2. 水理模型実験

(1) 投入と静止の比較実験

(a) 模型ブロックと実験水路

災害時に実際に使用されるブロックに関する知見が得られることが目標であり、まずブロック投入時の基本的な特性を明らかにしていくことが目的である。そこで、

表-1 使用したブロック模型の諸元

	タイプA 基本型	タイプB とがり型	タイプC へん平型	タイプD ねじり型
実物質量 ^{※1} kg	2,060.8	2,051.6	2,019.4	1,927.4
模型質量 g	257.6	256.5	252.4	240.9
模型体積 cm ³	112	111	110	105
模型密度 g/cm ³	2.3	2.3	2.3	2.3
空隙率 ^{※2}	0.71	0.78	0.69	0.76
投影面積 ^{※3} cm ²	45.25	44.1	41.55	42.35

※1: 2t型ブロックの実物大を想定した場合の質量

※2: 単体を直方体で内包した場合の体積に対する模型部分を除いた体積の比

※3: 長軸が底面に平行、流れ方向に対して垂直に置いたときの流れ方向に対する面積であり、タイプCは値が小さくなる置き方の場合の値

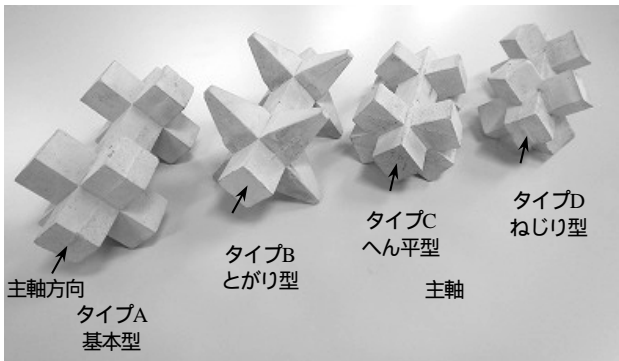


写真-1 模型ブロック（矢印が主軸の方向）

写真-1のような一軸の主軸の両端近くに脚部となる突起が両端付近に4個ずつ計8個ある形状の2t型ブロックの1/20スケール模型を製作して流水内のブロックの挙動を確認する実験を行った。実スケールに換算する際にはフルード則で換算することを想定した。模型ブロックは以下に示す4種類を製作した。タイプAは基本型として脚部が直方体で主軸の面と脚部の面とが全て垂直に交わっているもの、タイプBはとがり型で脚部の先端を細めたものであり、河床に脚部がめり込んだり引っかかったりすればブロックが河床にとどまりやすくなる可能性を想定したものである。タイプCはへん平型であり重心が低いと転動しにくいとの想定に基づいたものである。タイプDはねじり型であり脚部の面が流水に垂直に当たらず受け流すことで抵抗を弱められる可能性を想定したものである。なお模型ブロックは全て2t型ブロックを想定し、実物大を想定した質量が2tの±10%内に収まることを条件として設定し製作した。使用したブロック模型の諸元を表-1に示す。

実験に使用した水路は図-1に示すような幅0.7m、長さ10mであり、このうち5m部分に中央粒径 $d_{50}=0.943\text{mm}$ の混合粒径の砂を敷き詰め洪水時の移動床を想定した条件とした。水路勾配はLEVELであり、ポンプで給水した水を上流端から流下させ、下流端の堰上げにより水深を確保することでブロック配置箇所での流れが等流状態とみなせる状態となるよう配慮した。

(b)実験方法

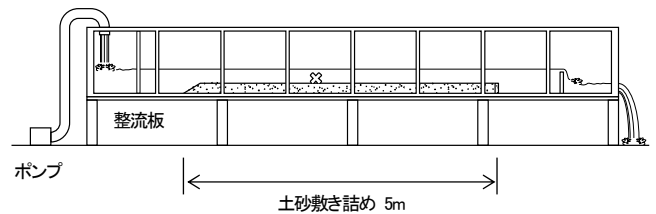


図-1 実験水路の模式図

ブロック投入を想定した実験（以下、投入実験）は、ブロックの主軸が水面と平行かつ流れの流下方向に垂直方向となるように持ち水面直上位置から自由落下させる方法として、流量を段階的に増加させ、その都度ブロックを投入してブロックが河床にとどまるか転動するかを確認した。投入実験の対案として、ブロックを河床に据え付けた静止状態からの河床からの離脱を想定した実験（以下、静止実験）を行った。静止実験の方法としては、河床に静止させた状態から通水流量を増加させ河床から離脱する限界流速を確認するのが本来の手法と考えるが、簡便化のためにここでは予め通水している流れのなかにブロックを手を持って沈めて河床にできるだけ静置させて手を離し転動するかを確認する方法とした。投入実験・静止実験ともにブロックの落下や河床への静置の間での実験者の動作誤差が含まれる懸念があるため、同一人物による作業と水路側面からの目視確認により動作の差異ができるだけ小さくなるよう配慮した。転動するかどうかの指標として流速を用いることとし、流速の計測は流量を段階的に増加させた際のブロックを静置または投入する直前のブロックがない状態で行い、ブロックを静置または投入する位置でのブロックの中心高さ付近に相当する高さとして河床から2cm程度の位置の流下方向の流速をプロペラ流速計で計測した。なお、ブロックは主軸と脚部で構成される3次元的な形状であり、鉛直流速分布を考慮した上で各々のブロックに対する抗力の作用点を定めることは困難であるため、2次元的な考察を行う本研究では、主軸に対して脚部が対称の形状であり、ブロックが河床に静止または着地したときのほぼ中心高さとなるこの高さでの流速を抗力に関わる流速として代表できるものとみなした。

投入実験は各流量段階で5回繰り返し、対案の静止実験は3回の繰り返しとした。なお、投入実験ではブロックが河床に着地するときに落下時と同様にブロックの主軸が河床面と平行かつ流れの流下方向に垂直となることを目視で確認し、著しく異なる着地となった場合は結果から除外することとした。

3. 実験結果

(1) 実験結果の概要

投入実験と静止実験の結果を図-2に示す。また投入実験の一例の連続写真を写真-2に示す。投入実験と静止実

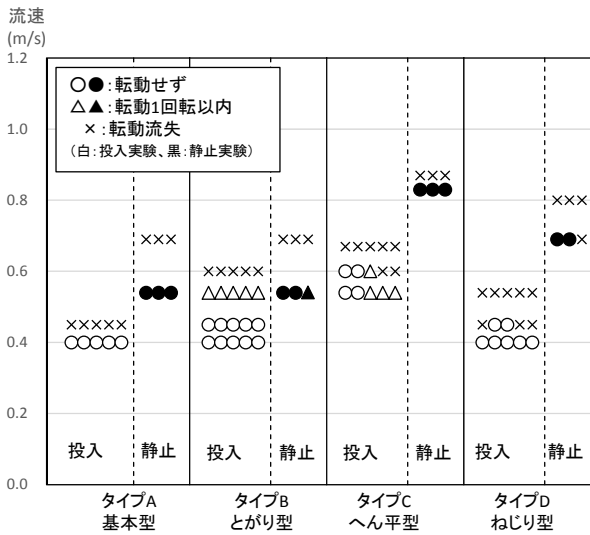


図-2 実験結果（投入実験，静止実験）

験の比較では、タイプAからタイプDまで全てのブロックタイプで静止実験より投入実験の結果のほうが転動する流速値が低い結果が得られた。つまりブロックを投入した場合のほうが、静止状態の場合よりブロックは転動しやすいとの結果となった。ブロックタイプによる転動しやすさの違いについては、投入実験と静止実験ともにタイプCのへん平型が転動する流速値が高い結果となった。個別の特徴としては、タイプBのとがり型は投入時に少し回転して停止するケースが多く（図-2の△）、タイプCのへん平型は静止実験で転動する流速値が他のタイプより極めて高かった。タイプDのねじり型は静止実験では転動しにくかったものの、投入実験では転動する流速値が低い結果となった。

(2) 投入実験でのブロック形状による転動特性

(a) 突起のとがりの効果（タイプBについて）

タイプBのとがり型は、ブロックが水中を落下した際に突起が河床にめり込んだり引っかかりやすければ転動しにくくなると想定した形状であるが、タイプAの基本型よりは転動しにくいものの、転動する流速値は大差なかった。ブロックの挙動をビデオ映像で確認すると、河床に着地する際の突起の河床へのめり込みは他のタイプとそれほど変わらない。しかし図-2の△で示すように流速を増加させたときに、転動したあとすぐに停止するケースが多く生じたことがほかのタイプと異なる現象であり、転動するうちに突起が河床にめり込み停止する効果があることが示されている。つまり河床に着地する瞬間にブロックの突起が河床にめり込まなくても、転動する間に突起が河床にめり込んでブロックが停止することを期待できる結果が示された。

(b) 重心高さ低減の効果（タイプCについて）

タイプCのへん平型はブロックの重心を偏らせ低くすることで抗力が作用する高さを低くし、流れによってブ

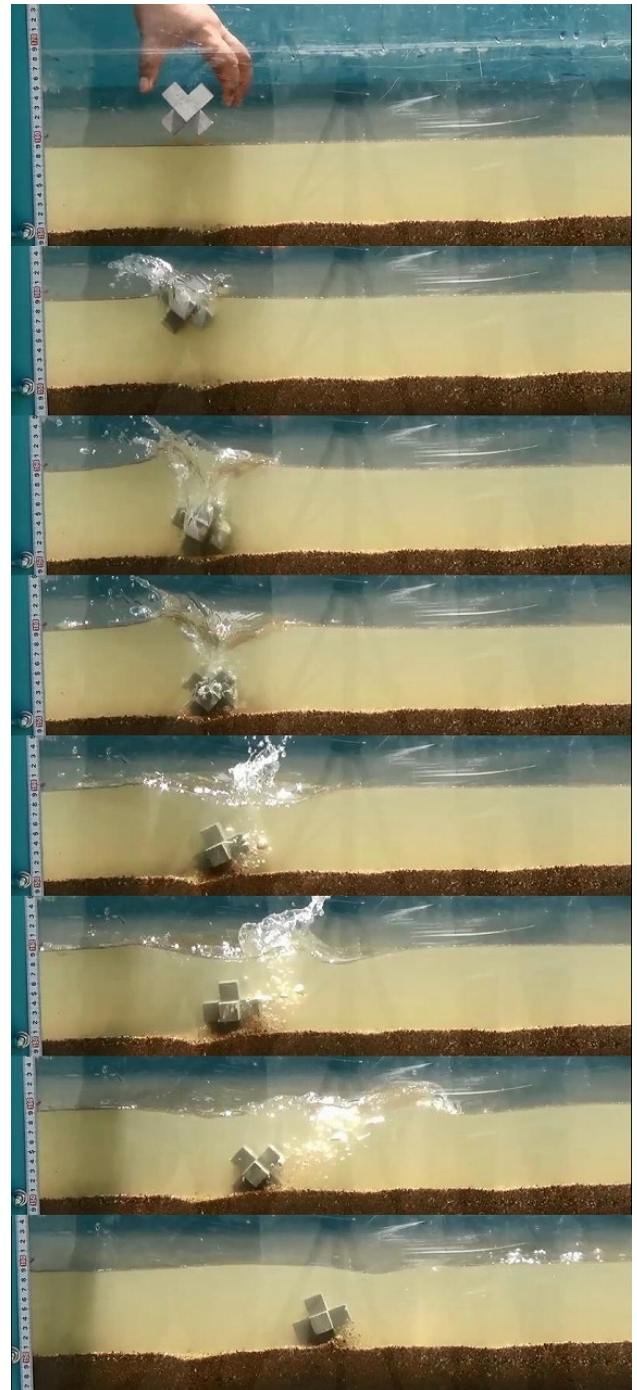


写真-2 実験写真（投入実験：タイプA基本型の転動時の例）

ロックに作用する回転モーメントが小さくなることで転動しにくくなることを期待したものである。結果としては全4タイプのなかで最も転動する流速値が高かった。流れの抗力 D によるブロックの流れ方向のモーメント M_1 は、ブロックに作用する代表流速を V 、流れ方向の投影面積を A 、ブロックの突起の河床面との接点から代表流速が作用する位置までの河床面からの高さを L_1 として単純化させると(1)式のような近似式で表される。

$$M_1 = \frac{\rho_w}{2} C_D A V^2 \times L_1 \quad (1)$$

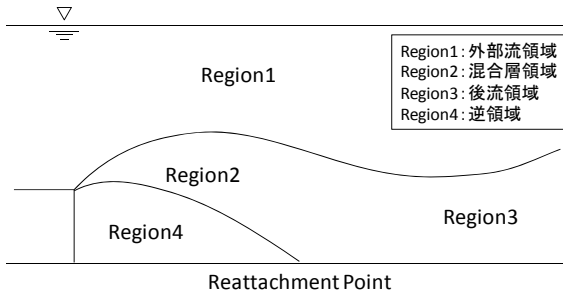


図-3 実験水路の模式図⁵⁾

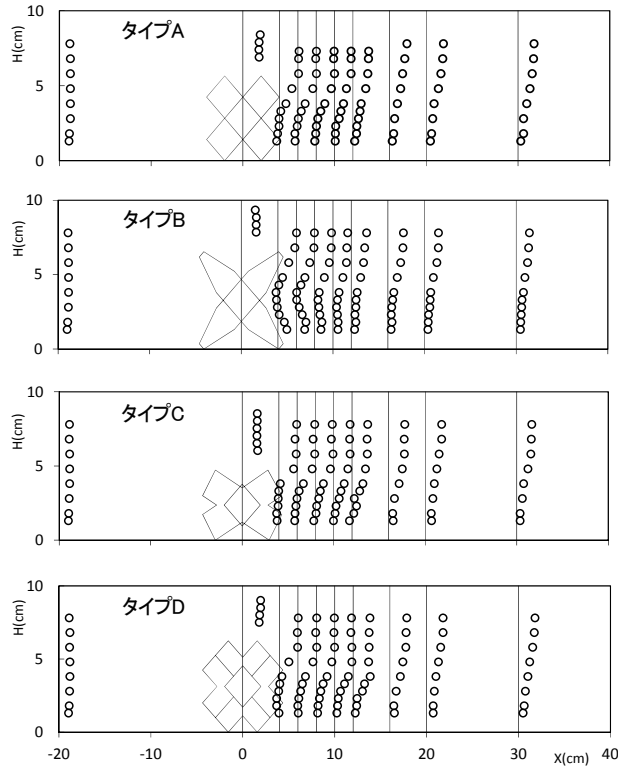


図-4 後流の流速分布計測結果

ここで ρ_w ：水の密度， C_D ：ブロックの抗力係数である．(1)式より，タイプBはブロックをへん平させることで L_1 を小さくすることを狙ったものであるが， L_1 と同時に投影面積 A も小さくなり，ブロックを転動させるモーメント M_1 が小さくなることから，ブロックが転動しにくい要因となったと考えられる．

(c) 流れの抵抗低減の効果（タイプDについて）

タイプDのねじり型は，突起の方向をタイプAの基本型から45度ねじることで流れに対する突起部の抵抗を弱めて転動しにくくなることを狙ったものであるが，タイプAの基本型よりは転動する流速値がやや高いものの，タイプBやタイプCより転動しやすい結果となった．特にタイプCの結果と比較すると，式(1)での抗力係数 C_D が小さくなることを想定したものであり，表-1での投影面積がほぼ同等であることを考慮すると，抗力係数 C_D が想定ほど小さくなっていない可能性が伺えた．またブロックの重量が基準値の $\pm 10\%$ 以内と設定した範囲内では

表-2 抗力係数の算定結果と転動に関するモーメント

		タイプA 基本型	タイプB とがり型	タイプC へん平型	タイプD ねじり型
x_k	cm	20.0	16.0	16.0	16.0
y_k	cm	4.8	4.8	3.8	4.8
U_1	m/s	0.27	0.21	0.23	0.26
k	cm	5.7	6.4	4.7	6.2
C_D		1.62	1.92	1.47	1.64
L_1	m	0.029	0.032	0.024	0.031
L_2	m	0.014	0.030	0.017	0.011
M_1^{*1}	N m	0.1393	0.1806	0.0957	0.1435
M_2	N m	0.1682	0.3557	0.2018	0.1246
M_2/M_1		1.21	1.97	2.11	0.87

※1：流速0.4m/sとして算出

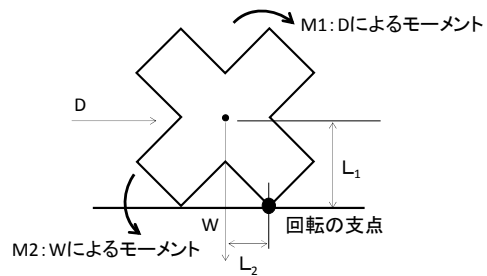


図-5 静止時のブロックに作用するモーメント模式図

あったが，他のタイプより軽かった（タイプAに比べ約7%軽量）ことが結果に影響した可能性もある．

4. ブロック形状による抵抗の検証

ブロックの形状による抵抗の違いについて抗力係数を評価して比較する．河川ブロックの抗力係数の評価では，山本ら³⁾や俣熊ら⁴⁾などにより示されているような分力計を用いて計測する方法があるが，ここでは以下に示す後流モデルを用いることとした．後流モデルについては，透過水制に関する解析について示した長谷川ら⁵⁾によるものとし，これによると透過水制の下流側に生じる流れは概念的に図-3のように示され，ブロックの前後の運動量の差と作用する力との関係から抗力係数 C_D を含めて式(2)のように表される．

$$\int_0^{y_k} u(U_1 - u)dy = \frac{1}{2} C_D (1 - n) k U_1^2 \quad (2)$$

ここで y_k ， U_1 ：後流領域と外部流領域の境界の河床からの高さ流速， u ：流下方向流速， n ：ブロックの空隙率（2次元補正ため $2/3$ 乗の値を使用）， k ：ブロックの投影高さである．なお，式(2)は長谷川ら⁵⁾によるものであり本論での詳細な記述は省略する．

流速分布を計測する実験は，投入・静止実験で使用した実験水路で行った．ただし河床は洗掘進行防止のために固定床とし，河床面の粗度を合わせるために投入・静止実験に使用した土砂を河床固定面に貼りつけた．また後流で急激な段落流が生じないように水路下流端近

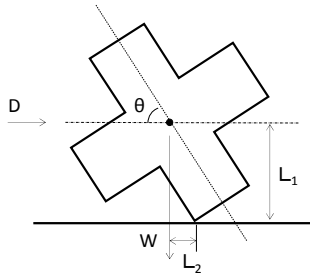


図-6 投入時のブロック転動のモデル化の模式図

くで堰上げた．ブロックは縦断方向に1個，横断方向には流れができるだけ2次元になるよう水路幅全体に配置し，流量は17.0l/sとしてタイプAからタイプDまで同様の条件で流速の鉛直分布を計測した．流速分布の測定結果を図-4に示す．

各タイプの流速分布の計測結果を見ると，ブロックの下流側10cm程度の範囲でRegion4の逆領域が明瞭に生じていることがわかる．またタイプBはブロックの直下流の流速分布が他のタイプと異なっている．これはブロックの突起が長いために主軸と河床面との隙間が大きくここを通過する流れが速くなったと推察される．またタイプDは主軸付近の高さの流速があまり弱まっていないことがわかる．突起部が流れに対してとがっていることで流れが分岐し弱められずにブロックを通過していることが流速分布から見てとれる．

ブロックに作用する流速が0.4m/sの場合を想定し，図-5のように抗力 D ，重力 W ，式(2)により算出した各タイプの抗力係数 C_D の値，さらにこの C_D を用いた式(1)による転動方向のモーメント M_1 と重力による転動と反対方向のモーメント M_2 の値と M_1 と M_2 の比を表-2に示す．なお，ブロックの転動に関わる揚力によるモーメントについては，揚力係数 C_L が抗力係数 C_D と比較して1オーダー程度低いことが山本ら³⁾の護岸ブロック実験でも示されていることからここでは考慮しないこととした．ここで x_k は後流領域と外部領域の境界を想定した位置の図-4における x 座標である． x_k と y_k の位置は明瞭ではないため流速分布の形状から判断した．抗力係数 C_D はタイプCのへん平型が最も小さくタイプBのとがり型が最も大きい．この結果からこれらのブロック形状の抗力係数 C_D は突起形状の影響より流れに対する投影面積が大きく影響すると推察できる．またタイプDのねじり型は突起部の流れの抵抗を弱めることを狙った形状であるが，抗力係数 C_D は基本型のタイプAと同程度となった．突起部の面に流れが衝突することを緩和させたものの，突起部で分岐した流れどうしが衝突して混合することにより抵抗のような効果をもたらしていることが考えられる．

抗力による転動のモーメント M_1 と重力による転動を抑える方向のモーメントの比 M_2 / M_1 は静止状態での流れによる転動しにくさ単純化して表したものである．概ね静止実験の結果の傾向と同じであるが，タイプDのね

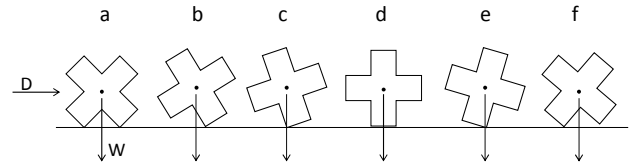


図-7 投入されたブロックが河床に到達した瞬間の状態

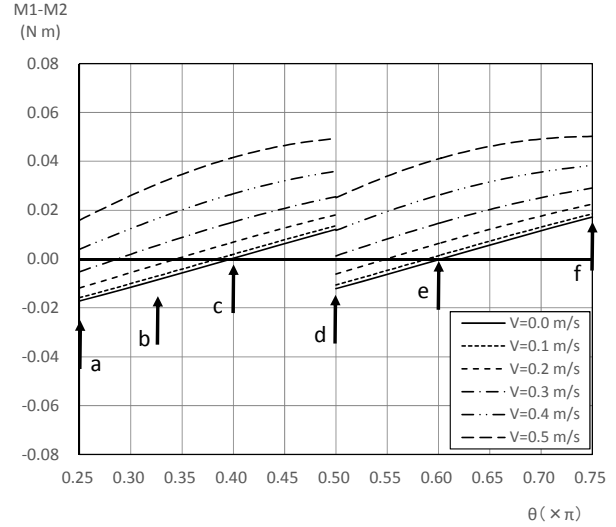


図-8 ブロックが河床に到達したときの状態と転動のしやすさ

じり型の M_2 / M_1 が最も小さい値となっている．突起の形状による L_2 が小さいことがモーメントに影響しているもの考えられるが，静止実験では河床に突起が沈むことでこの影響が弱められたことが考えられる．

5. 投入した場合の転動しやすさについて

類似したブロックでも流れに対する抵抗が突起の形状や流れに対する投影面積の違いで異なり，流水中での転動のしやすさの違いにつながっていることがわかった．では投入実験と静止実験で結果に違いが現れたような，ブロックが河床に静置された状態より投入されたときのほうが転動しやすいのはなぜなのか．ビデオ映像でブロックの挙動を観察し，ブロックが河床に着地した瞬間から流れ方向に回転し始めていることに着目し，河床にブロックがどのように着地するかの違いから力学的に考察する．

本実験で使用したような主軸の両側に突起としての脚部をもつ形状のブロックでは，ブロックが河床に静置されているときは4本の脚部で河床と接する．これに対して，ブロックが水中に投入されて河床に到達した瞬間はほとんどの場合いずれかの脚部が1点で河床に接し，重力と流れの抗力の作用を受けながら回転して停止または転動することになる．これをタイプAの基本型に対して2次元で単純化したモデルで説明する．

図-6のように抗力 D ，重力 W ，ブロックの脚部の長さ半幅を L_1 ， L_2 とし，脚部の軸の水平からの傾きを θ とする．ブロックが河床に到達した瞬間を図-7のように模式

的に示すと、流れがない場合 ($D=0$ の場合) a,d,fのいずれかの状態で河床に着地するとブロックに回転が生じないが、現実的にはこれは極めてまれであり、ほとんどの場合はこれらの間の状態で河床に着地する。

流れの抗力 D によるモーメント M_1 は式(1)で表され、ブロックの脚部の傾きが θ のときの M_2 は、

$$M_2 = mg \times L_2 \quad (3)$$

で表される。 $M_1 > M_2$ の場合にブロックが流れ方向に回転するとみなすことができ、 $\pi/4$ から $3\pi/4$ の範囲で流速を変化させて M_1 - M_2 の値を算定すると図-8のようになる。図-8の各曲線がdで不連続となるのは、ブロックの回転の支点がdの状態では脚部の上流側の角から下流側の角に移動するためである。

流れがないときの $V=0\text{m/s}$ では、aからcまでの状態とdからeまでの状態で河床に到達した時には流れと逆方向に回転するが、それ以外の状態では流れ方向に回転することになる。流れ方向に回転する割合は $V=0\text{m/s}$ では50%であるが、流速が増加すると $M_1 > M_2$ となるような流れ方向に回転するケースが多くなり、流速が $V=0.1\text{m/s}$ では57%、 $V=0.2\text{m/s}$ では73%、 $V=0.3\text{m/s}$ では93%、 $V=0.4\text{m/s}$ を超えると100%の割合で流れ方向に回転することになる。

静止時と投入時の違いを考えると、静止時とはaの状態であり、例えば投入実験において $V=0.3\text{m/s}$ では投入されたブロックが河床に着地する瞬間の93%の割合で流れ方向に回転することになる。aの状態では回転の初速がつかない静止状態と比べると、投入されたブロックのほうが河床に着地してから回転運動をしやすくなる。このような流下方向への回転の初速がつかないことが、静止状態より投入時のほうがブロックが回転しやすい大きな理由であると考えられる。なお、図-2の実験結果での回転する流速値と図-8の力学モデルをもとにした M_1 - M_2 による結果は正確には合致しないが、河床着地時に回転の初速が生じてaの状態になったときに回転が止まることもあり、必ずしも河床着地時の初期の回転が回転につながるには限らないこと、河床着地時に脚部が河床にめり込み、投影面積や抗力として作用する流速に差異が生じることなどによる影響を受けるためと考えられる。回転の初速によるその後の回転形態の詳細についての考察は今後の課題とする。

ここでは主軸の両側に脚部が各4本ある形状を対象に考察を進めたため、脚部の本数や形状が違う場合に同様の傾向が現れるか厳密にはわからないが、静止時と投入時の条件の違いが概ね適用できる場合には同様の結果が得られると考えられる。

6. まとめ

本論文で得られた結論を以下に示す。

- ・ 主軸の両側に脚部が複数ある形式のブロックにつ

いて、流水中に静置された場合と流水中に投入された場合を想定し、流速を増大させたときの回転する限界を比較する実験を行った結果、静置された場合より投入された場合のほうが回転する限界流速は低い結果となった。

- ・ 脚部の形状を変化させた場合の比較では、ブロック全体をへん平させる形状の場合が回転する限界流速が高い結果となった。脚部の先端をとがらせると回転するうちに河床に脚部がめり込み回転が停止することがあった。脚部の取り付け方向をねじり流れに対する抵抗を弱める狙いをもった形状では回転する限界流速を高める結果は得られなかった。
- ・ ブロックを河床に静置した場合より投入した場合のほうが流水中で回転しやすい理由を単純な力学モデルで検証した結果、投入されたブロックが河床に不安定な状態で着地し流れ方向に回転する回転運動が生じることが大きな理由であることが示された。

謝辞：ブロック模型の設計・製作では共和コンクリート工業株式会社技術研究所の浅利修一氏に協力頂いた。また実験結果の考察にあたり株式会社北開水工コンサルタント先端技術開発センターの長谷川和義氏から助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター編：改訂護岸の力学設計法，山海堂，2007。
- 2) 国土開発技術研究センター：堤防決壊部緊急復旧工法マニュアル，1999。
- 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) 俣熊公子，前野詩朗，吉田圭介，高田大資，山村明：射流場の護岸・根固めブロックに作用する流体力評価，土木学会論文集B1（水工学）Vol. 69 No. 4，I_691-I_696，2013。
- 5) 長谷川和義，柿崎恒美：透過質媒体の下流域における流れの構造，土木学会北海道支部論文報告集 平成元年度，第46号，pp.297-302，1990。

(2014.9.30受付)