

水中に投入したブロックの河床での回転運動に関する基礎的な考察

一般財団法人 北海道河川財団 正会員 山本 太郎
 正会員 東海林 勉
 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 飛田 大輔
 非会員 島田 友典

1. はじめに

洪水時に河岸侵食箇所や破堤箇所などに緊急対策として水防備蓄ブロックを投入する際、洪水の流れの中に投入したブロックは転がって想定位置にとどまらないとの指摘がある。投入したブロックが静止状態のブロックより転動しやすい理由をブロックが河床に到達する瞬間の力学的な不安定さから前報¹⁾で説明したが、引き続きブロックの回転運動から考察した。

2. ブロック転動形態

(1) 投入時と静止時との違い

ここでは前報¹⁾の水理模型実験の結果を使用する。図1に示す幅0.7m、長さ10mの水路の中間部5mに粒径 $d_{50}=0.943\text{mm}$ の混合粒径の砂を敷き詰め、通水した状態で写真1に示す2t型ブロックの1/20スケール模型を投入または静置させてブロックの挙動を確認した。実験結果は図2の通りであり、静止時より投入時のほうが小さい流速で転動した。

(2) 河床着地の瞬間の傾きの影響

図3のように抗力 D 、重力 W 、ブロックの脚部の長さ L と幅 b をそれぞれ、脚部の軸の水平からの傾きを θ とする。脚部は幅を持つが簡単のため脚部の中心軸での挙動を考えると、ブロックが河床に着地した瞬間の抗力によるモーメント M_1 と重力によるモーメント M_2 は、

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

$$M_2 = mg \times L_2 \quad (2)$$

で表される。ここに ρ_w :水の密度、 C_D :ブロックの抗力係数、 L_1 :ブロックの中心高さ、 L_2 :回転支点からブロック中心までの水平距離である。ブロックが河床に着地した瞬間の θ と M_1 と M_2 の差の関係を流速ごとに算定すると図4のようになる。 M_1 と M_2 の差が正の時に即ちブロックが流れ方向に回転する場合で

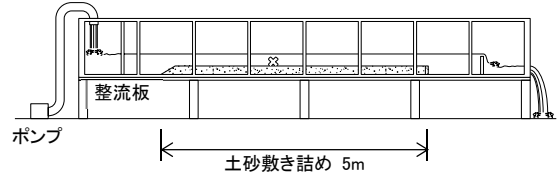


図1 実験水路の模式図

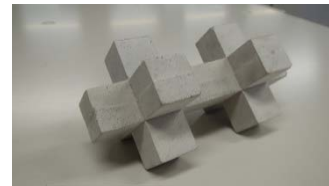


写真1 実験に使用した1/20ブロック模型

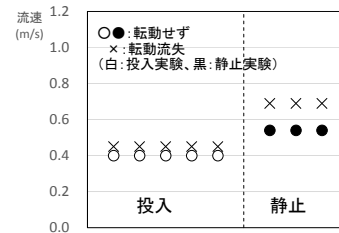


図2 水理模型実験結果

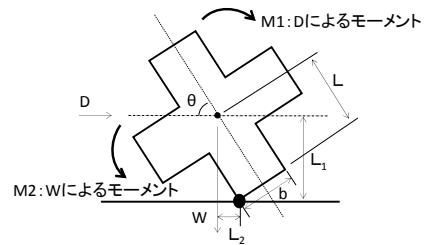


図3 投入時のブロックの状態の模式図

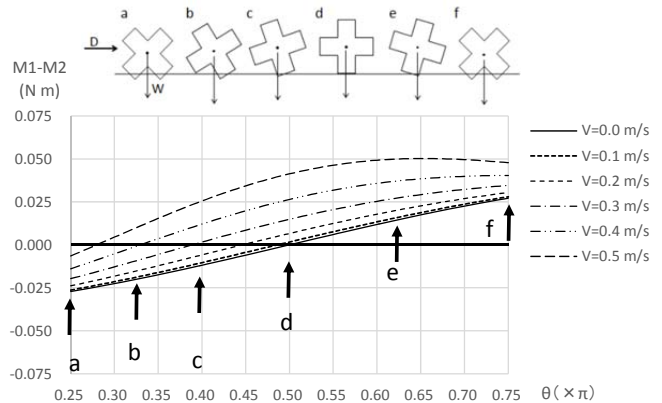


図4 ブロックの河床着地時の角度とモーメント

キーワード ブロック, 転動, 破堤, 緊急対策, 水防

連絡先 〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1伊藤110ビル 一般財団法人 北海道河川財団 TEL 011-729-8141

あり, $V=0\text{m/s}$ では流れ方向に回転する場合と流れと逆方向に回転する場合の割合が半々であるのに対して, 流速が増加すると M_1 と M_2 の差が正となる場合が多くなり, つまり河床着地直後にブロックが流れ方向に転がる場合が多くなることを示している.

(3) 河床着地から次の脚部が接地するまでの回転

実験に使用したブロックのように脚部の先端が幅をもつ形状であれば, 厳密には回転の支点は脚部の角部となるが, 簡単のため脚部の中心線の端部が支点となると考えて, 河床着地後の脚部を支点としたブロックの回転を運動方程式で表すと,

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_2 \quad (3)$$

となる. ここに I : 慣性モーメント, ω : 角速度である. 慣性モーメント I は平行軸の定理に基づいて重心から脚部の端部に回転軸をずらして算出する. 式(3)により傾き θ で着地したブロックが流れ方向に回転した場合に, 次の脚部が接地するまでの角速度 ω を算出したものが図5である. 流れの流速が増加すると傾き θ が小さい状態からも流れ方向に転動し, 傾き θ が小さい状態から回転し始めると次の脚部が接地する際の角速度 ω が大きくなることを示される.

(4) 回転支点の移動と回転運動の引き渡し

流れ方向にブロックが回転し次の脚部が接地すると支点が次の脚部に移るため回転運動が不連続となる. しかし速度をもって回転している状態で支点が次の脚部に移るため何らかの回転運動が次の支点での回転に引き渡されるはずであり, ここでは次のように回転運動が次の支点に引き渡されるものとした.

脚部の中心軸の微小要素の速度は回転支点からの距離と角速度 ω の積で回転支点を中心とした円の接線方向となりこの総和を支点 A での運動量 P_A とする. 回転支点が A 点から B 点に移る際, 微小要素の速度のうち B 点を回転支点とした方向成分が支点 B での回転運動に引き渡されるとしてその運動量の総和を P_B とすれば P_B/P_A は,

$$\frac{P_B}{P_A} = \frac{2 \int_0^{\pi/2} (1 + \tan(\theta - \pi/4)) \tan(\theta - \pi/4) d\theta}{2 + 1/\cos^2(\theta - \pi/4)} \quad (4)$$

となる. これは形状のみで決まる値であり対象とした脚部の長さが一律の十字型の場合は $P_B/P_A=0.21$ となる. これを支点 A から支点 B に引き渡される回転運動の割合とみなして, 支点 A での回転モーメン

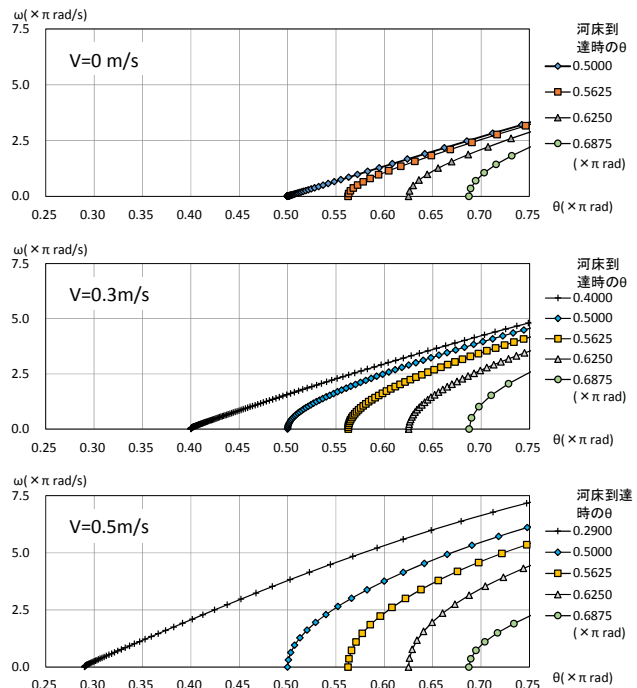


図5 河床に到達後のブロックの傾きと回転速度

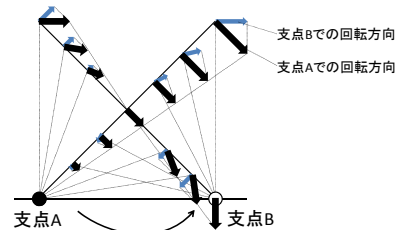


図6 支点移動と回転運動量の引き渡し模式図

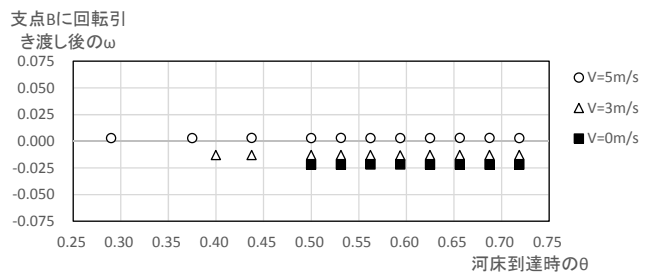


図7 支点引き渡し後の回転速度

トが支点 B での回転モーメントに上乘せされると考える. 図7は以上の考えをもとにした支点 A から支点 B に回転が引き渡された後の角速度 ω の計算結果である.

3. おわりに

流水中に投入されたブロックの回転運動について基礎的な考察を行った. 支点が繰り返し移る回転運動についてはさらに検討が必要である.

参考文献

1) 山本太郎ほか: 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, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I_517-I_522, 2015.