

## 捨石堰の破壊機構に関する基礎的研究

岡山県庁 正会員 ○大西利典

岡山大学大学院 学生員 森永 智

岡山大学環境理工学部 正会員 前野詩朗

## 1. はじめに

本研究では、自然石を用いた堰の実用的な水理設計を実施するための第一歩として、捨石堰に関する水理特性と破壊機構を明らかにしようとしたものである。実験は、水路長 5m、水路幅 0.4m、水路高 0.6m の可変勾配循環水路に堰モデルを設置して行った（実験の詳細は参考論文を参考）。また、捨石堰の破壊は、下流側法面付近から発生することが従来の研究により確認されている。そこで、堰の下流側法面勾配を変化させたものについてもあわせて実験を行い、破壊の発生機構を検討する。

## 2. 下流側法面勾配による堰破壊の実験

写真-1(a)～(c)は、それぞれ下流側法面勾配を 1:1.67(Case2a)、1:2.33(Case2b)、1:3.33(Case2c)と変化させた場合の破壊時の流況を示している。図-1 は各ケースの破壊時における上流水深、流量、そして下流側法面中央付近の石礫上の代表的な流速の関係を図示したものである。この図より、上流水深や流量から一義的に破壊を規定することは困難であり、逆に作用流速が堰の破壊の主要な要因となっていることがわかる。その他に、法面勾配の変化に伴う石礫同士の噛み合わせの効果も大きく影響していることが実験を通じて観察された。

## 3. 破壊に関する理論的検討

本研究では、堰の破壊を理論的に取り扱うための第一歩として、石礫を円形の粒子と仮定したモデルを提案する(図-2)。ただし、a, b, c: それぞれ A, B, C 粒子の中心、 $\alpha$ :河床勾配を含めた法面勾配、 $\beta$ :噛み合い角、 $\theta$ :抜け出し角、 $F_d$ :抗力、 $F_l$ :揚力、 $W$ :粒子の水中重量、 $F_s$ :浸透力、 $F_f$ :AB 粒子間摩擦力、 $F_{n0}$ :C 粒子が A 粒子におよぼす力、 $F_{f0}$ :AC 粒子間摩擦力である。また、このモデルにおいて、以下のような仮定を設けている。①3 つの石礫粒子は粒径の等しい球剛体とする。②B, C 粒子は動かないものとする。③作用流速はその時間的変動を考慮せず、常に一樣流速を与えることとする。④A 粒子の離脱はロッキングなどを考慮せず、わずかでも動けば完全に離脱したものとする。

石礫は、滑動もしくは回転運動で初期移動を起こすものとする。滑動は図-2 の接線 AB 上において、A 粒子を抜け出させようとする力とその抵抗力の釣り合いを考える。一方、回転は図-2 における A 粒子と B 粒子の接点 P 周りのモーメントの釣り合いを考える。つまり、A 粒子を回転させようとする時計回りのモーメントと、とどめようとする反時計回りのモーメントである。また本研究では、A 粒子の滑動あるいは回転に対して、それぞれ A 粒子を動かそうとする力を抵抗力で割った値を移動率と定義する。この値が 1 より小さい時には A 粒子は安定しているが、1 より大きくなると移動することになる。式(1)および式(2)は、それぞれ滑動、回転に対する移動率を示している。ここで、 $\rho$ :

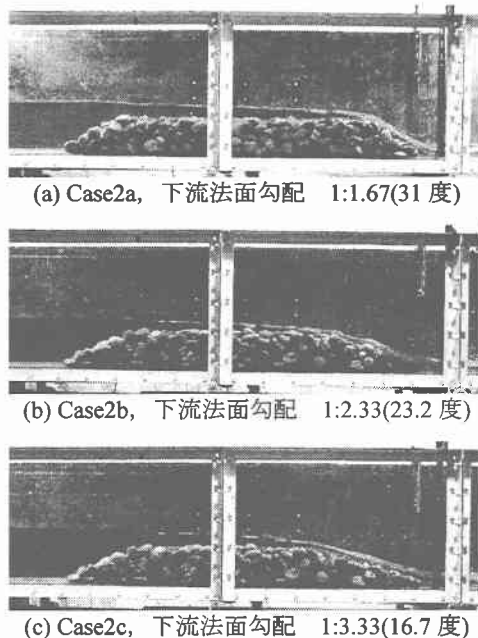


写真-1 下流側法面勾配を変化させた堰

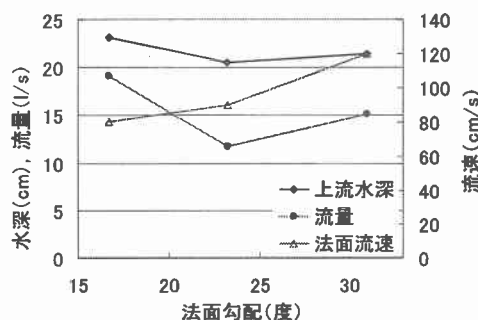


図-1 法面勾配による各測定項目の変化

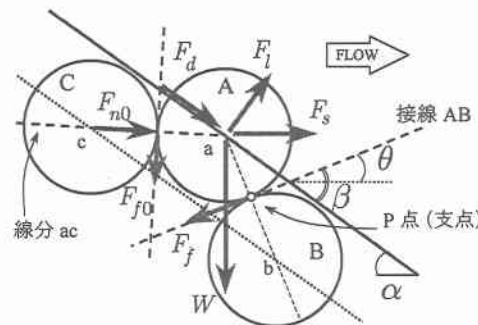


図-2 力学モデルの概要(下流側法面想定)

水の単位体積質量,  $C_d$ :抗力係数,  $C_l$ :揚力係数,  $\varepsilon$ :遮蔽係数,  $V$ :作用流速,  $A$ :投影面積,  $\sigma$ :粒子の単位体積質量,  $g$ :重力加速度,  $d$ :粒子の直径,  $\beta'_c$ :接線 AB に対する線分 ac のなす角度,  $\gamma'$ :接線 AB に対する浸透力ベクトルのなす角度,  $\beta_c$ :法面に対する線分 ac のなす角度,  $\theta_c$ :水平に対する線分 ac のなす角度,  $\gamma'_c$ :線分 ac に対する浸透力ベクトルのなす角度,  $\mu$ :摩擦係数である。また, (5)式中の  $plus()$  とは括弧内が正の値であればその値を, 負であれば 0 を代入することを示す。式中の各係数は, 抗力係数  $C_d$ :0.5, 揚力係数  $C_l$ :0.5, 遮蔽係数  $\varepsilon$ :0.5~1.0, 摩擦係数  $\mu$ :0.5 とした。

#### 4. 粒子移動モデルの妥当性の検討

捨石堰の破壊には, 下流側法面上の浸透力が影響を及ぼしていると考えられるが, その程度や作用方向が明確でない。そこで, 本研究では, 浸透力を考慮しない(s0), 接線 AB 方向に与える(s1), 法面に垂直に与える(s2), 水平に与える(s3)の 4 ケースについて浸透力の影響を検討した。その結果以下の事がわかった。①浸透力を考慮する s3 の場合の方が危険側に判定する。②浸透力の方による影響は少ない。③C 粒子の及ぼす影響は  $\theta$  が大きい段階で発現し, かつより大きい。④本実験範囲では常に滑動よりも回転に対する危険度が大きい。また, C 粒子の影響に関しては, 法面勾配が緩くなるに従って (Case2b,2c)小さくなることもわかった。浸透力の方による影響は少なかつたため, 以下においては, 実験結果による平均的な方向, すなわち水平方向に与える s3 のケースについて検討する。

図-1 に示したように, Case2a, Case2b, Case2c の各勾配における粒子の移動限界流速は, それぞれ 120(cm/s), 90(cm/s), 80(cm/s)であった。これらの限界流速が作用した場合の各勾配の移動率を図-3(a)~(c)に示している。この図は,  $\theta$  (横軸)が変化した時の移動率(縦軸)の変化を示している。図中の灰色の帯は, 図-1 の状態での, 各ケースの移動率が 1 の時における  $\theta$  の範囲である。また, 破線(右)は Case2a における本来の限界抜け出し角の位置を示しており, 一点鎖線(中央)は Case2b を, 二点鎖線(左)は Case2c の場合をそれぞれ示している。ここでは, Case2a~2c の 3 ケースにおいてそれぞれの線種上での移動率に注目する。これらの図より, 限界状態よりも早い流速を与えられると粒子は移動し(図-3(a)参照), 限界状態よりも遅い流速を与えても破壊しない(図-3(c)参照)という実験結果を再現していることがわかる。これらの結果から, 提案した力学モデルは本研究の範囲において粒子の初期移動をよく再現していると言える。

今後は, さらに実験の範囲を広げた検討を行うとともに堰体内を通過する流れの解析によりさらに詳細な検討を進める予定である。

#### 参考文献

1) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 大西利典 (2002): 自然石を用いた堰の水理特性, 水工学論文集, 第 46 巻 2) 末次忠司 (2000): ふとんかご設計にあたっての中込材への流体力と金網変形, 粒体力の評価とその応用に関するシンポジウム講演論文集, pp.25-30. 3) 中川博次, 辻本哲郎, 後藤仁志 (1991): 非定常性を考慮した砂粒子の離脱過程のモデル化, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.429-434.

滑動に対する釣り合い式:

$$\frac{F_d \cos \beta + F_l \sin \beta + F_{n0} \cos \beta'_c + F_s \cos \gamma'}{W \sin \theta + F_f + F_{f0} \sin(-\beta'_c)} \quad (1)$$

回転に対する釣り合い式:

$$\frac{F_d \cos \beta + F_l \sin \beta + F_{n0} \cos(2\beta - 90) + F_s \cos \gamma'}{W \sin \theta + F_{f0}(1 + \sin(2\beta - 90))} \quad (2)$$

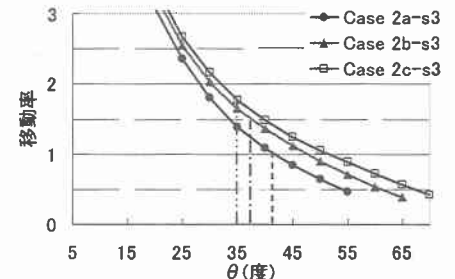
ここに,

$$F_f = \mu F_n, \quad F_{f0} = \mu F_{n0} \quad (3)$$

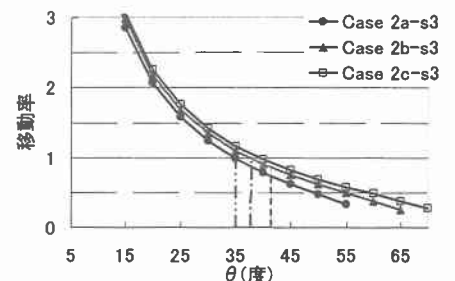
$$F_n = F_d \sin \beta - F_l \cos \beta + W \cos \theta - F_s \sin \gamma' - F_{n0} \sin \beta'_c + F_{f0} \cos \beta'_c \quad (4)$$

$$F_{n0} = plus(W \sin \theta_c - F_d \cos \beta_c - F_l \sin \beta_c - F_s \cos \gamma'_c) + plus(-W \sin \theta_c) \quad (5)$$

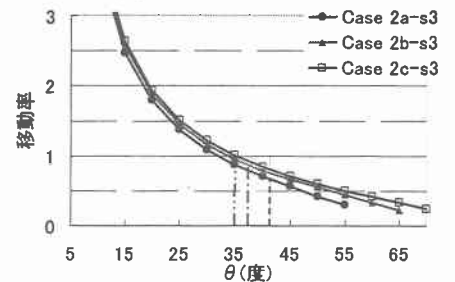
$$\text{ただし, } F_d = \frac{1}{2} \varepsilon \rho C_d A V^2 \quad F_l = \frac{1}{2} \varepsilon \rho C_l A V^2 \\ W = \frac{1}{6} \rho (\sigma / \rho - 1) g \pi d^3$$



(a) 作用流速 120(cm/s)



(b) 作用流速 90(cm/s)



(c) 作用流速 80(cm/s)

図-3 作用流速による移動率の変化