

捨石堰の破壊機構のモデル化

MODELING OF DESTRUCTION MECHANISM OF A RUBBLE MOUND WEIR

前野詩朗¹, 道奥康治², 森永 智³, 大西利典⁴

Shiro MAENO, Kohji MICHIOKU, Satoru MORINAGA and Toshinori OHNISHI

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生会員 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

⁴正会員 工修 岡山県 水島港湾事務所 (〒712-8056 倉敷市水島福崎町1-12)

Nature-friendly hydraulic structures such as a rubble mound weir are attracting attention in recent years. Therefore, it is important to get the information about the destruction mechanism of a rubble mound weir. In this point of view, this study was carried out to investigate basic hydraulic characteristics in a failure stage of the rubble mound weir. As a result, it is clarified that the velocity at downstream weir slope, the seepage force in the rubble mound weir and gradient of downstream weir slope have an effect on the failure of the weir. Furthermore, the authors proposed a destruction model on the first stage failure of the rubble mound weir and confirmed the validity of the destruction model.

Key Words: rubble mound weir, nature-friendly structure, failure process, seepage force, destruction model

1. はじめに

近年の自然環境に対する住民意識の高まりを受けて、河川においても河川が本来有する自浄能力、川のせせらぎ、景観などの人々に恵みとやすらぎを与えるような自然環境に配慮した整備が望まれるようになってきた。このような背景から平成9年5月に河川法が改正され、それまでの治水・利水に加えて「河川環境の整備と保全」が河川整備の目的に加わり、今後の河川整備計画を抜本的に見直していく必要に迫られている。従来型の河川構造物は、コンクリートを使用した不透水性の構造が多く、その中でも河川の縦断方向のつながりを分断する堰は、川の自然環境機能を阻害するものとして非難されることが多い。その半面、自然石を用いた堰（以下、捨石堰と呼ぶ）は、低水時においても堰体中を絶えず流体が流れ、景観、環境面において不透水性の堰よりも有利な点が多く、利用が期待されている。そこで著者らは不透水性の堰構造の代わりに捨石堰を構築し、基本的な水位-流量特性やそれらを規定する水理量を明らかにしている^{1),2),3),4),5)}。また、堰の破壊は堰が有する利水機能を低下させるだけでなく、堰周辺の護岸の破壊をもたらし、河川の治水機能をも低下させるため、その破壊機構を明らかにしておくことは工学上重要な課題であるとの観点から堰の破

壊過程についても実験的な検討を行っている⁶⁾。しかし、堰の破壊過程を明らかにして構造物設計に取り入れていくためには実験的な検討に加えて理論的に破壊のメカニズムを明らかにしておく必要がある。そこで本研究は、捨石堰の初期段階における破壊に着目して、以下のa)~e)の因子が堰の破壊に及ぼす影響について実験的に検討するとともに石礫の初動機構に着目した力学モデルを提案し、その妥当性を検証する。

- a) 堰下流部法面上の流速
- b) 石礫の大きさ、質量
- c) 法面勾配
- d) 堰内部を流れる浸透流
- e) 石礫同士の噛み合わせの効果

2. 実験の概要

本研究では、図-1に示すような水路長5m、水路幅0.4m、水路高0.6mの可変勾配循環水路に各種堰モデルを設置して実験を行った。堰モデルは、捨石堰が平均粒径3.2cmと4.8cmの2種類の堰（それぞれCase1a, Case2aとした）を用いた(写真-1)。これらについて、堰破壊時の流速、水深、および間隙水压などの水理量について計測を行った。なお堰破壊時の水理量は堰の初期設置状況により若干変動するた

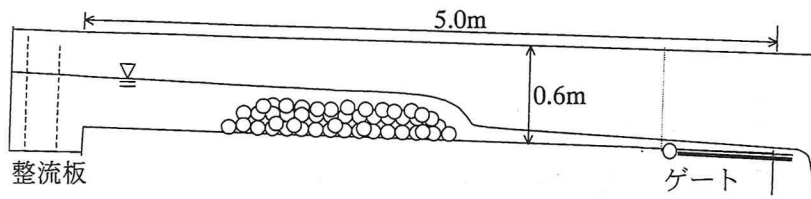


図-1 実験装置

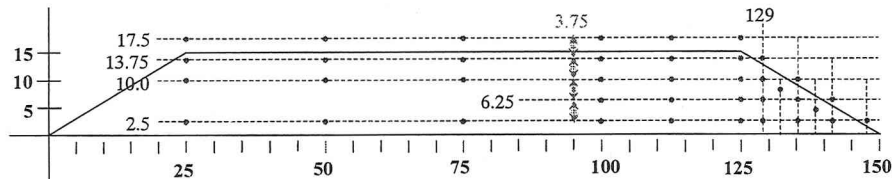
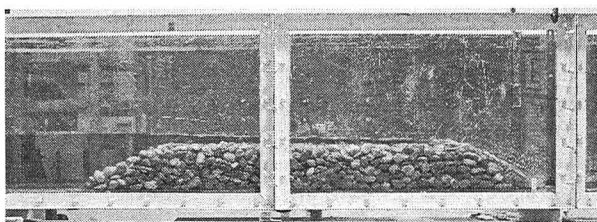
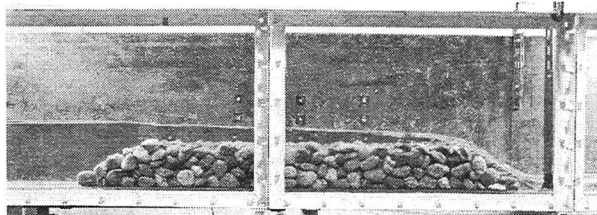


図-2 間隙水圧測点

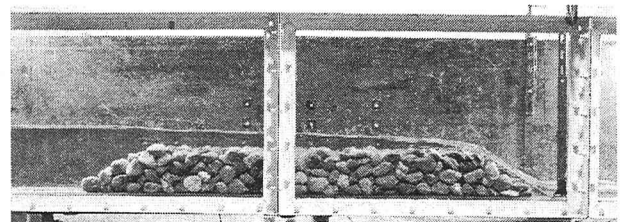


(a) Case1a(捨石堰・粒径3.2cm)

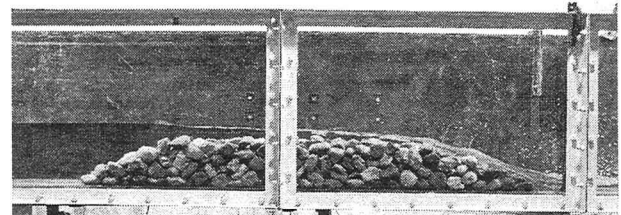


(b) Case2a(捨石堰・粒径4.8cm)

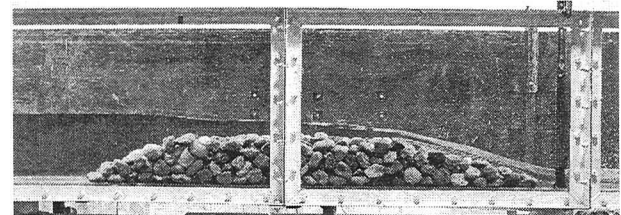
写真-1 実験で用いた堰(Case1a, Case2a)



(a) Case2a, 下流法面勾配 1:1.67(31度)



(b) Case2b, 下流法面勾配 1:2.33(23.2度)



(c) Case2c, 下流法面勾配 1:3.33(16.7度)

写真-2 下流側法面勾配を変化させた堰(Case2)

め、あらかじめ石礫が移動し始める流量を5回計測し、その平均流量を与えたときの流況について下流法面の石礫が移動しないように金網を設置した状況下で測定したものである。以下においては、破壊するときの平均流量を破壊時の流量としている。また、間隙水圧については、水路左岸側面に図-2に示す位置に間隙水圧測点を設け、それぞれに直径2mmのシンプレックスチューブを取り付け、堰内部および周辺の水圧を測定できるようにした。さらに下流側法面勾配を変化させ勾配の違いによる破壊時の上流水深、流量、破壊発生部周辺（下流側法面中央付近）の流速を測定した。

3. 実験結果

(1) 粒径および勾配の違いによる破壊特性

捨石堰の破壊は、堰を越流し始める直後から下流側法面付近において段階的に発生することが従来の実験によって明らかにされている^{1),2)}。本研究ではその中でも、初期段階の破壊を取り上げ、粒径およ

び勾配の違いが破壊に及ぼす影響について検討する。写真-2(a)～(c)は、それぞれ粒径4.8cmの堰における下流側法面勾配を1:1.67(31度)、1:2.33(23.2度)、1:3.33(16.7度)と変化させた場合の破壊時の流況を示している。粒径3.2cmの場合もこれと同様の堰を構築し、破壊時の上流水深、流量および下流側法面中央付近の石礫上の代表的な流速を測定した。図-3～図-5は測定結果を図示したものである。但し、粒径3.2cmの堰については、いずれの勾配においても越流水深が低かったため、流速は測定できなかった。図-3と図-4を見ると粒径3.2cmの堰では勾配の違いによる堰破壊時の上流水深および流量には大きな変化は見られないのがわかる。一方で、粒径4.8cmの

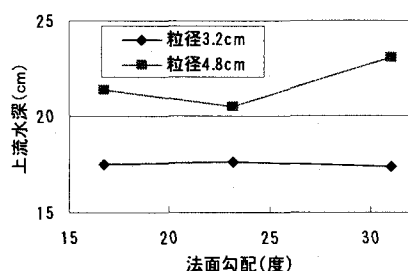


図-3 法面勾配と破壊時の上流水深の関係

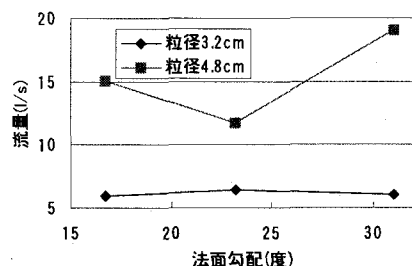


図-4 法面勾配と破壊時の流量の関係

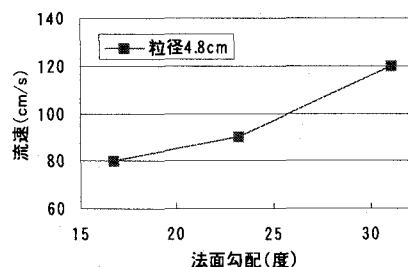


図-5 法面勾配と破壊時の流速の関係

堰では3.2cmの堰と比較すると全体的に破壊しにくくなっている。勾配の違いについて見ると写真-2(b)に示す勾配の時、最も破壊しやすくなっているのがわかる。このことから粒径の大きさは、堰の破壊に大きく影響しているが、上流水深や流量から勾配の変化による破壊を一義的に規定することは困難であることがわかる。一方、図-5に示すように、流速と勾配との関係を見ると、法面勾配が急になるほど破壊時の流速が大きくなることから、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

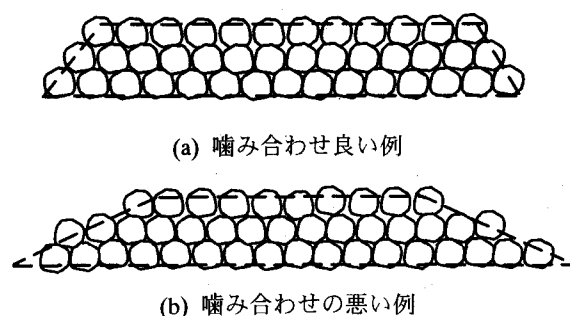


図-6 勾配による石礫の噛み合わせの変化

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。すなわち、図-6に示すように堰の法面勾配が急になると法面上の石礫間の噛み合わせが良くなり、石礫が抜け出しにくくなる。一方、法面勾配が緩くなると図に示すように法面上の石礫の噛み合わせが悪くなる。次章ではこの噛み合わせの効果も考慮した力学モデルを提案する。

(2) 浸透力特性

図-7は、図-2で示した間隙水圧測点で得られたピエゾ水頭の値を内挿補間することにより動水勾配を求め、堰体内における単位体積あたりの浸透力(動水勾配×水の単位体積重量)を算出した結果を図示している。なお、流況についてはいずれも堰の初期段階の破壊が発生する流量を与えたものである。100cm断面までは粒径による大きな違いは見られず、25cm断面から50cm断面にかけて一旦堰体内に流入した流れが堰天端の流れに連行されるように流出していることが推定される。このことは、堰天端上の各断面において流速を水深方向に積分することにより求めた天端上通過流量と、測定流量との差により求めた堰内部通過流量の割合からも現象を概略的ではあるが説明できている⁶⁾。100cm断面からは、浸透力が急激に大きくなり、かなり乱れてきているが、浸出面では特に水面に垂直な浸透力が顕著

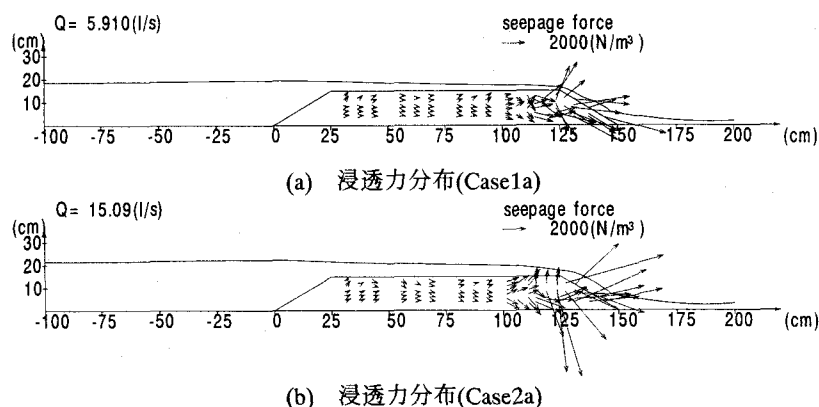


図-7 浸透力分布

になっているのがわかる。石野ら⁷⁾も急潮流下の橋脚周辺の捨石工内部で発生する浸透流が石礫の安定性と密接に関係していることを指摘している。したがって、このような堰内部に発生する浸透流が、堰破壊の要因の一つとなることが推察される。次章ではこの浸透力の影響についても検討する。

4. 破壊に関する理論的検討

(1) 初動機構に着目した力学モデル

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^{8),9),10)}。すなわち、図-8に示すような下流側法面上に注目粒子Aとその上流側にC粒子、下流側にB粒子を法面勾配に沿って配置する3粒子モデルを考える。A粒子は上下流側2個の粒子の中央に位置しているものとする。ただし、a, b, c : それぞれA, B, C粒子の中心、 α : 河床勾配を含めた法面勾配、 β : 噛み合い角 ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$)、 θ : 抜け出し角 ($0^\circ \leq \theta \leq (90 - \alpha)^\circ$)、 F_d : 抗力、 F_l : 揚力、 W : 粒子の水中重量、 F_s : 浸透力(単位体積あたりの浸透力×粒子の体積)、 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。実験では一つの粒子が単独で抜け出すことにより破壊が始まることや、このような力学モデルを設計に適用するためには、なるべく簡便な方法が望まれることなどを考慮して、本モデルにおいては粒子を球形とし、以下のような仮定を設けている。

- ① 3つの石礫粒子は粒径の等しい球剛体とする。
- ② B, 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。
- ④ A粒子の離脱はロッキングなどを考慮せず、わずかも動けば完全に離脱したものとする。

A粒子の移動形式に関しては石礫を球剛体と仮定しているものの、下流側のB粒子が不動であり支点Pが確立していることと、わずかも動けば元に戻ることなく完全離脱をするという仮定から、転動を考慮せず滑動もしくは回転運動で初期移動を起こすものとする。すなわち、滑動は図-8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¹¹⁾。一方、回転は図-8におけるA粒子とB粒子の支点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。図-9(a),(b)は、図-6でも示したように、それぞれA粒子と上下流粒子の噛み合わせの悪い場合と良い場合の例を示したものである。 β が小さい場合には噛み合わせが悪くなり、大きくなるとかみ合わせが良くなる。 β が最も大きい場合は、3つの粒子が法面上に一列に並ぶ。このよ

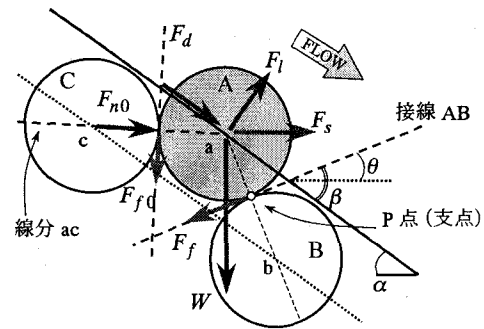


図-8 力学モデルの概要(下流側法面想定)

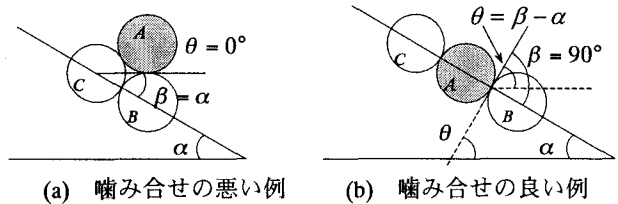


図-9 β と θ による粒子の噛み合わせの表現($\alpha = 23.2^\circ$)

うに、本モデルでは β を変化させることによって、A粒子と上下流粒子の噛み合わせを表現することができる。

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それに抵抗する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。

滑動に対する移動率 p_s を表す式：

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

回転に対する移動率 p_m を表す式：

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

ここに、

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

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

$$F_{n0} = \text{plus}(-W \sin \theta_c) \quad (5)$$

$$\text{ただし、} F_d = \frac{1}{2} \varepsilon \rho C_d A V^2 \quad F_l = \frac{1}{2} \varepsilon \rho C_l A V^2$$

ρ : 水の単位体積質量、 C_d : 抗力係数、 C_l : 揚力係数、 ε : 遮蔽係数、 V : 作用流速、 A : 投影面積、 σ : 粒子の単位体積質量、 g : 重力加速度、 d : 粒子の直径
 β'_c : 接線ABに対する線分acのなす角度 ($-90^\circ \leq \beta'_c \leq 30^\circ$)、 γ' : 接線ABに対する浸透力ベクトルのなす角度 ($-(90 + \theta)^\circ \leq \gamma' \leq (90 - \theta)^\circ$)、 β_c : 法面に対する線分acのなす角度 ($0^\circ \leq \beta_c \leq 60^\circ$)、 θ_c : 水平に対する線分acのなす角度

$(-\alpha^\circ \leq \theta_c \leq (60-\alpha)^\circ)$, γ'_c : 線分acに対する浸透力ベクトルのなす角度 $(-(90+\theta)^\circ \leq \gamma'_c \leq (90-\theta)^\circ)$, μ : 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, 既往の論文での適応例^{9),10),11),12)}から抗力係数 C_d :0.5, 揚力係数 C_l :0.5, 遮蔽係数 ε :0.5~1.0, 摩擦係数 μ :0.5を採用した。なお遮蔽係数とは, 注目粒子に対する上流側粒子による遮蔽効果を表現するものである。注目粒子に作用する流体力は, 同じように表面に露出している他の粒子によって一部分遮蔽され, 流れから受ける抵抗が減少することが知られている。本モデルでは β_c の変化に応じて0.5から1.0まで線形に与えた。 $(\beta_c = 0^\circ$ のとき $\varepsilon = 0.5$, $\beta_c = 60^\circ$ のとき $\varepsilon = 1.0)$

(2) 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様でなく浸透力の方向を一義的に規定することは困難である。そこで, 本研究では, Case2a~2cのそれぞれのケースについて, 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する。また, 石礫の初動形式, C粒子の有無による粒子間の噛み合わせの影響についても合わせて検討を行う。解析条件として, 各勾配における作用流速は図-5で示した表面流速を与え, 浸透力の大きさは, 破壊時における下流法面近傍の浸透力の平均値を与えた。図-10(a)~(c)はCase2aについて, 抜け出し角 θ を変化させた時の移動率を示したものである。なお横軸に β ではなく θ を用いたのは, 法面勾配の影響を除外するためである。(a)は浸透力が破壊におよぼす影響について示したものである。(b)は滑動と回転を同時に示したもので, 実線が回転, 破線は滑動を示している。(c)は噛み合わせの効果について示したもので各ケース名の最後のcは上流側C粒子がA粒子に及ぼす影響を無視した場合を示している。なお, 曲線上において移動率が1のときに限界抜け出し角となる。図-10(a)を見ると, 浸透力は堰の破壊に影響を及ぼしているが, 浸透力の方向による影響は少ないことがわかる。また, 図-10(b)から, 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ことがわかる。さらに図-10(c)から, θ が大きくなるにしたがい噛み合わせの効果が顕著になり, 上流側C粒子の影響を考慮しない場合は破壊が生じやすくなっている。このことからC粒子の影響は考慮すべきであると考えられる。図には掲載していないが, C粒子の影響は, 法面勾配が緩くなるに従って小さくなることがわかった。

浸透力の方向による影響は少なかったため, 以下

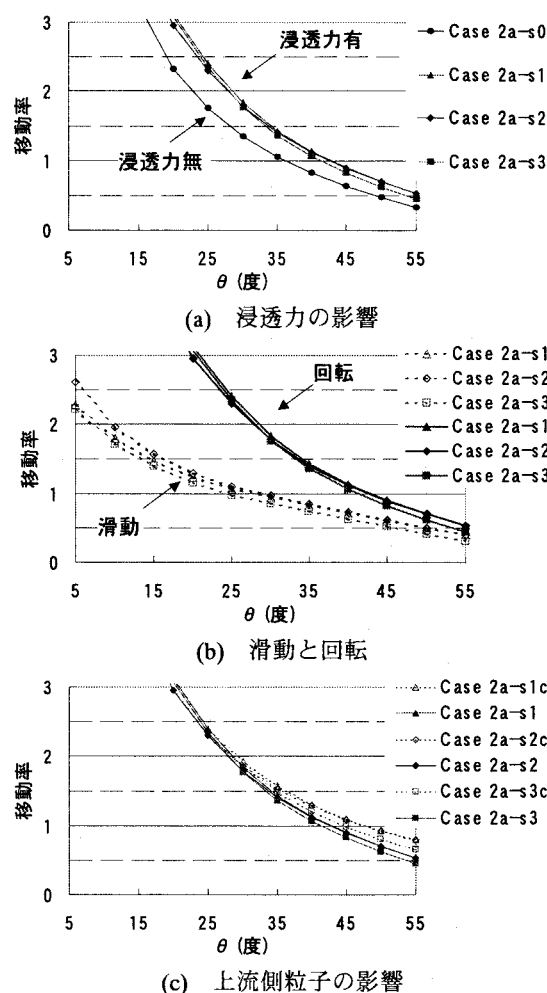


図-10 抜け出し角による移動率の分布(Case2a)

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-11は, 各法面勾配における回転に対する移動率 p_m の分布を示したものである。これを見ると, いずれの場合も抜け出し角 θ が大きくなるほど移動しにくくなることがわかる。また, 堰下流法面勾配が急になるほど移動率が1となる限界抜け出し角は大きくなる。これは, 法面勾配が急なほど粒子の噛み合わせが良くなるためであると考えられる。図中の灰色の帯は法面勾配の変化による限界抜け出し角の範囲を示しているが, 35~41°の範囲に集中しており, その差はそれほど大きくないことがわかる。また, 破線(右)はCase2aにおける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。

図-5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における移動率を図-12(a)~(c)に示している。なお, 図中の破線, 一点鎖線, 二点鎖線はそれぞれ図-11のそれに対応させている。ここでは, Case2a~2cの3ケースにおい

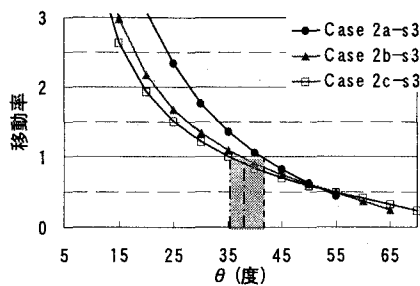
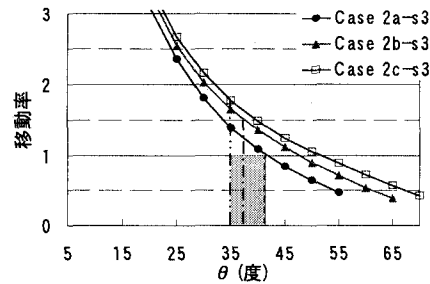
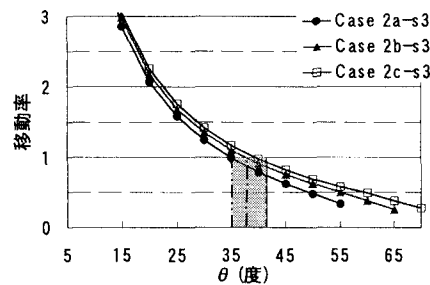


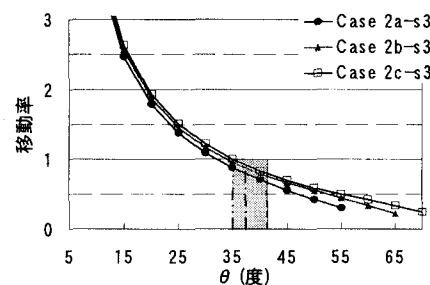
図-11 Case s3における移動率 p_m の分布



(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-12 作用流速による移動率 p_m の変化

で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、限界状態よりも大きい流速を与えられると粒子は移動し(図12-(a)参照)、限界状態よりも小さい流速を与えても破壊しない(図12-(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、本実験範囲において粒子の初期移動をよく再現できていると言える。

5. 結論

本研究では、捨石堰の破壊に影響を与えている因子について実験的に検討を行い、それらを考慮に入れた力学モデルを提案した。その結果以下のような

ことがわかった。

- 1) 堰の破壊には、堰下流側法面中央付近に作用する流速、法面の勾配、堰内部を通過する流体による浸透力、そして堰体を構成する石礫同士の噛み合わせの効果が影響している。
- 2) 本実験の範囲内で石礫の離脱は、滑動形式より回転形式の方が常により早く離脱する。
- 3) 石礫の初動機構に注目した力学モデルは、石礫の移動をほぼ表現できる。

今後は、実験の範囲を拡げた検討を行うとともに透過性の堰周辺の流れの解析を行うことにより、より正確な破壊時の水理量を把握し、精度良い捨石堰の破壊予測モデルを構築する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、(財)ウエスコ学術振興財団学術研究費助成金(代表：前野詩朗)並びに文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)(1)(代表：道奥康治、課題番号：14350268)の補助のもとで行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 前野詩朗、道奥康治、森永智、大西利典：自然石を用いた堰の水理特性、水工学論文集、第46巻、pp.493-498、2002。
- 2) S.Maeno, K.Michioku, S.Morinaga and T.Ohnishi : Hydraulic characteristics of a rubble mound weir and its failure process, Proc. of 5th ICHE, D-170, 2002.(CD-ROM)
- 3) 道奥康治、福岡達信、古澤孝明：捨石堰における通過流量特性、水工学論文集、第45巻、pp.391-396、2001。
- 4) 道奥康治、前野詩朗、古澤孝明、羽根田正則：捨石堰の「水位-流量」特性を規定する水理量、水工学論文集、第46巻、pp.487-492、2002。
- 5) K.Michioku, S.Maeno, T.Furusawa and M.Haneda : Discharge through a permeable rubble mound weir, Proc. of 5th ICHE, D-109, 2002.(CD-ROM)
- 6) 前野詩朗、道奥康治、大西利典、森永智：捨石堰の破壊時の水理特性、応用力学論文集、Vol.5, pp.657-664、2002。
- 7) 石野和男、大谷英夫、勝井秀博：急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究、土木学会論文集、No.521, pp.123-133、1995。
- 8) 河村三郎：土砂水理学1, pp.44-64、1982。
- 9) 末次忠司：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、流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、2000。
- 10) 中川博次、辻本哲郎、後藤仁志：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、1991。
- 11) 岡部健士、中野晋、吉田弘：混合砂礫床の粗粒成分の移動限界に関する基礎的研究、水工学論文集、第35巻、pp.397-402、1991。
- 12) 伊藤一教、東江隆夫、勝井秀博：個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法、海岸工学論文集、第48巻、pp.806-810、2001。

(2002. 9. 30受付)