

捨石堰の破壊時の水理特性

Hydraulic characteristics in a failure stage of a rubble mound weir

前野詩朗*, 道奥康治**, 大西利典***, 森永 智****

Shiro Maeno, Kohji Michioku, Toshinori Ohnishi and Satoru Morinaga

*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)

**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1-1)

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

****岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

Nature-friendly hydraulic structures made of natural material are attracting attention in recent years. In this point of view, the authors have investigated basic characteristics of a rubble mound weir and clarified the discharge-water-level characteristics and so on. 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 and the seepage force in the rubble mound weir have an effect on the failure of the weir.

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

1. はじめに

我が国の河川整備の多くは高度成長期の工業化や都市化の中で, 治水・利水を主な目的として行われたものである。また, 経済性が最優先されたため, 三面張りに代表されるような無味乾燥で画一的な河川整備が全国各地で行われた。このような河川整備の結果, 災害が減少し河川水の利用効率が急速に高まったことにより, 我々の生活の安全性や利便性はかなり向上した。しかし一方では, 我々の身近なオアシスであった河川環境の破壊も同時に進み, 単なる排水路と化した河川も見られるようになった。このような背景のもと, 我々の身近な河川の自然環境を保全し後世に引き継いでいく必要があるとの観点から, 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った。このような法整備と前後するように, 全国各地で自然石あるいはそれを模した材料を用いた多自然型の川づくりが盛んに進められるようになってきている。しかし, 確立された設計指針が無いのが現状であり, 安全性に対する考え方など経験に頼って施工することを余儀なくされている。今後, 益々環境に配慮した河川整備が進むことを考えると, 環境に配慮した川づくりのための技術的指針を早急に確立する必要がある。

以上のような河川環境に配慮した河川整備が進む中, 河川の縦断方向のつながりを分断する堰は, その殆どがコンクリートや鋼製の不透水性の堰であり

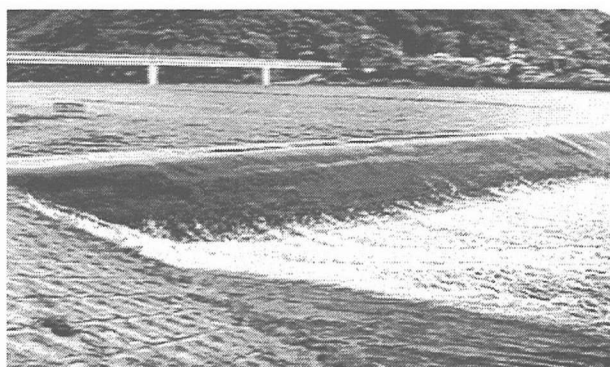


写真-1 コンクリートによる堰の例 (岡山県旭川)

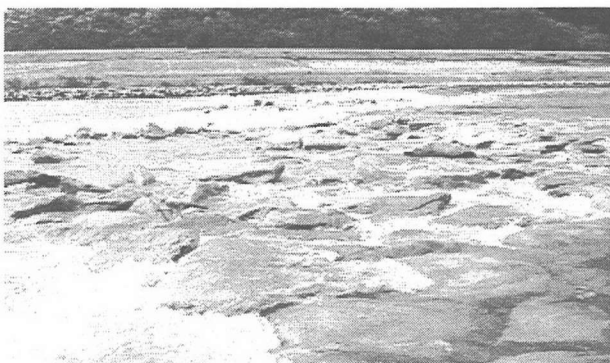


写真-2 自然石による堰の例 (岡山県旭川)

(写真-1は, コンクリート製の堰の一例である), 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。一方, 本研究で対象としている自然石による堰は (写真-2は, 自然石を用いた堰

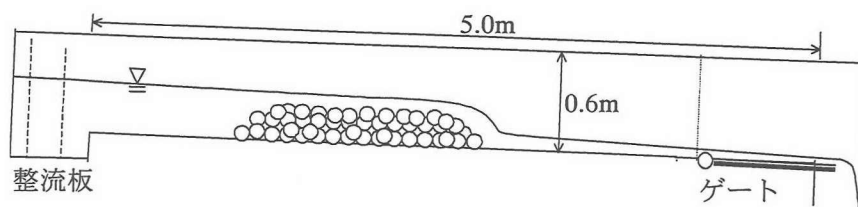


図-1 実験装置

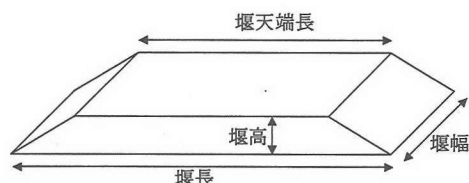


図-2 堰の概略図

表-1 実験条件

堰長	1.5m	堰天端長	1.0m
堰幅	0.4m	間隙率	0.40
堰高	0.15m	堰下流法面勾配	31°, 23.2°, 16.7°

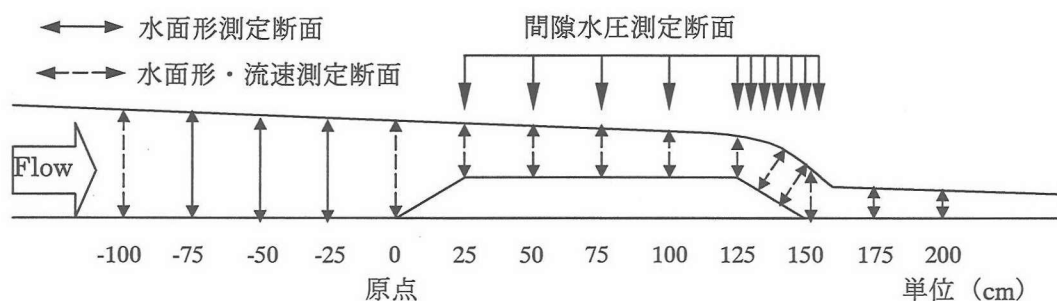
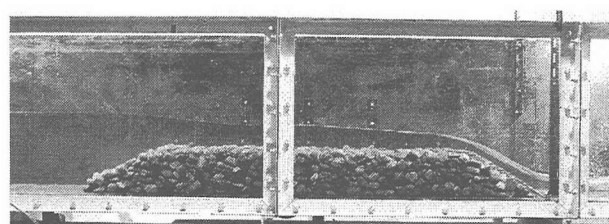
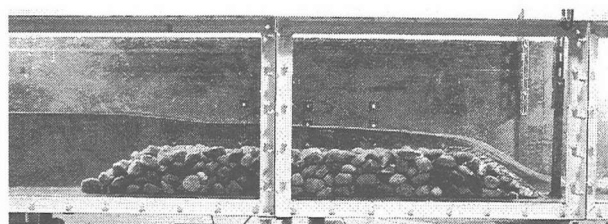


図-3 測定断面（水深，流速，間隙水圧）



(a) Case1(捨石堰・粒径3.2cm)



(b) Case2(捨石堰・粒径4.8cm)

写真-3 実験に用いた堰

の一例である），従来のコンクリートや鋼製の堰とは異なって，自然石の間隙を流水が流下することが可能である．また，自然石を用いた堰においても不透水性の堰と同等の堰上げ効果が期待できる^{1),2)}．したがって，流水が疎通可能となることにより，水生生物や水質の上下流の連続性が保たれるのみならず，堰体内における曝気効果も期待できる．

以上のようなことを考慮して，著者らは捨石堰に関する水理特性を実験的に検討してきている．その結果，基本的な水位－流量特性やそれらを規定する水理量，また，堰の破壊過程などを明らかにしている^{1),3),4)}．本研究は，堰の破壊を理論的に取り扱うための基礎として，粒径を変化させた場合の破壊の進行過程，並びに堰の破壊時の水理特性を実験的に明らかにしようとするものである，

2. 実験の概要

本研究では，図-1に示す水路長5m，水路幅0.4m，水路高0.6mの可変勾配循環水路の中央部に捨石堰モデルを設置して実験を行った．堰体材料には現地河川で採取した平均粒径3.2cmと4.8cmの2種類の石礫（いずれもほぼ同程度の粒径の石礫である）を用い，図-2に示すような台形の堰モデルを作成した．表-1はその諸元を示している．写真-3に示すように粒径の異なるケースをそれぞれCase 1およびCase 2とした．これらについて，堰下流側法面が破壊するときの水面形，流速分布，間隙水圧を測定した．また，下流法面勾配を変化させたときの破壊時の流況も合わせて計測した．図-3は水深，

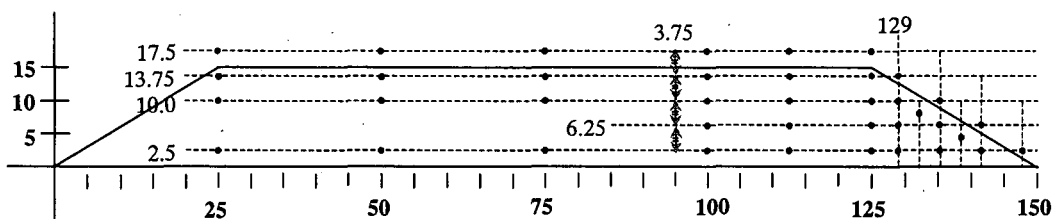


図-4 間隙水圧測点

流速および間隙水圧の測定断面を示している。水深は25 cm断面ごとの全13断面においてポイントゲージにより測定した。流速分布の測定には直径3 mmのピトー管を用い、原点より上流側100 cm断面と、原点から下流側125 cm断面までの6断面、および下流側法面において測定した。図-4は間隙水圧測点の詳細を示している。図中の丸印の位置に間隙水圧測点を設け、直径2 mmのシンプレックスチューブを取り付け、堰内部および周辺部の水圧を測定した。測定した間隙水圧は堰下流側法面を基準面としたピエゾ水頭に換算した。なお、破壊時の流速や水深などの水理量については、堰の初期設置状況により若干変動するため、あらかじめ石礫が移動し始める流量（図-5の①の状態）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。この水路下流端のゲートにより下流端水位を制御できるようにしているが、本研究ではゲート開度は全開にして、堰の越流条件として完全越流になるように設定した。

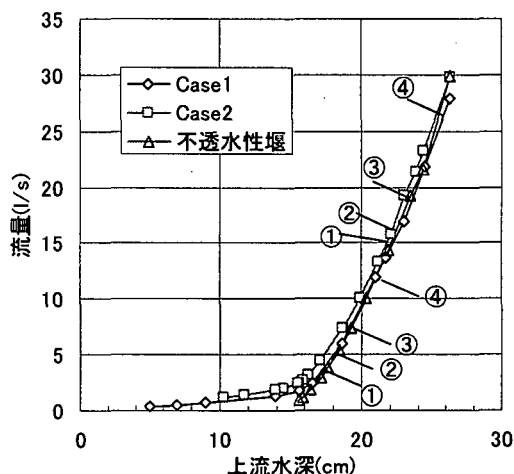


図-5 上流水深と流量の関係

る。不透水性の堰と比較すると、流量が多くなると不透水性の堰と同等かむしろ捨石堰の方が堰上げ効果を期待できるようになることがわかる。これは、表面粗度が多いことと、堰内部との流量交換が活発に行われていることが原因であると考えられる。

3. 実験結果および考察

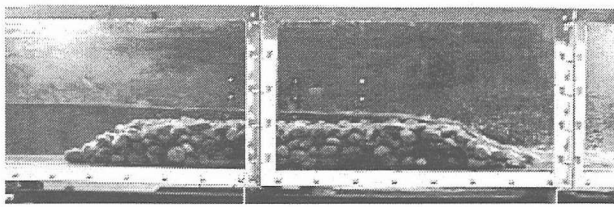
3.1 上流水深－流量特性

図-5は上流水深と流量の関係を示している。捨石堰の場合、流量の増大とともに下流法面で破壊が生じるので下流法面に金網で保護工を取り付けて行った実験結果を示している。参考までに、ベニヤ板で作成した同形状の不透水性の堰を用いて行った実験結果も合わせて図示している。また、図中の丸数字は次節で述べる捨石堰の破壊の進行段階を示している。この図より、Case 1, Case 2の何れも上流水深が堰高15 cmに達するまではわずかな流量の増加に対して水深が急激に増加していることがわかる。これより、捨石堰は流量が少ない場合においてもかなり堰上げ効果が期待できることがわかる。上流水深が約16 cmを越えるあたりから完全に越流し始めるが、水深と流量の関係は不透水性の堰とほぼ同様な変化傾向を示すことがわかる。粒径の違いに着目してみると、粒径が大きくなると若干ではあるが堰上げ高が減少している。これは、粒径が大きくなったことによる間隙の増大が原因であると考えられ

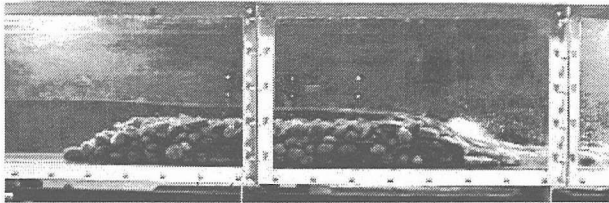
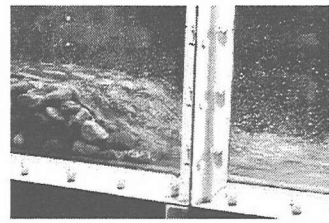
3.2 破壊の進行過程

写真-4は粒径の大きなCase2の場合について、上流からの供給流量を徐々に増加させた場合における堰の破壊の進行過程を示している。この写真および図-5中に丸数字で示したそれぞれの堰の破壊段階より以下のことがわかる。

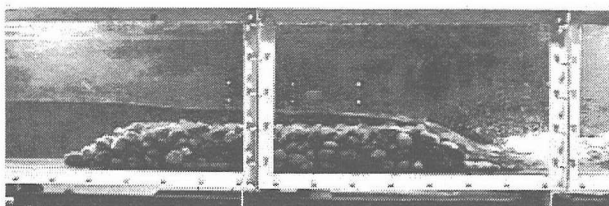
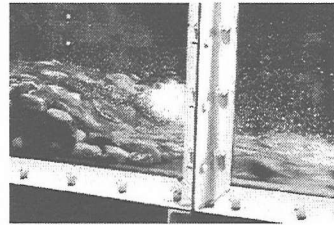
堰の破壊は、まず、越流開始後堰の下流法面中央付近の石礫が抜け出すような形で発生する。石礫が一つ抜け出す場合もあれば幾つか同時に抜け出す場合もある。さらに流量を増加させると法肩へと破壊が進行していく。しかし、破壊は連続的に進行するのではなく、流量の増加とともに段階的に進行する。すなわち、写真-4(a)に示すように越流し始めたあたりから堰下流部の法面中央付近で第1段階の破壊が起こり、ある程度安定した状態になる。その後、しばらくは流量が増えても安定した状態を保ち、流量がある限界を超えると写真-4(b)に示すような第2段階の破壊が始まるといった具合である。このように堰の破壊は、安定期と破壊を繰り返しながら進行する。繰り返し行った破壊実験の結果によると、概ね写真-4に示すような4段階のステップを



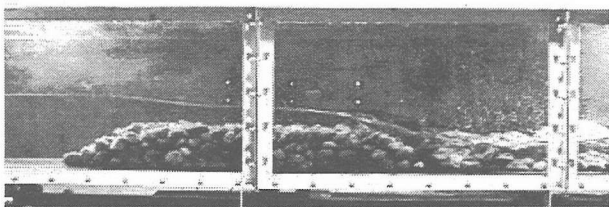
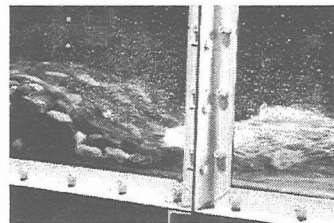
(a) 第1段階の破壊 (流量: 15.1 l/s)



(b) 第2段階の破壊 (流量: 16.5 l/s)



(c) 第3段階の破壊 (流量: 20.4 l/s)



(d) 第4段階の破壊 (流量: 28.7 l/s)

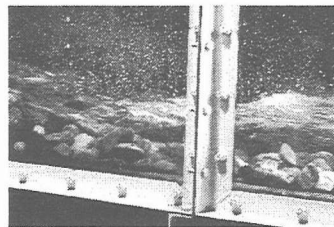


写真-4 破壊の進行過程(Case2)

経て破壊が進行することが明らかにされた。写真には掲載していないが、このような段階的な破壊の特徴はCase 1の粒径が小さな場合においても見られた。段階的に進行する堰の破壊時の水深と流量との関係を図-5の丸数字に示しているが、粒径が大きくなると第1段階の破壊が生じる流量が大きくなることがわかる。

図-6は、各破壊段階間の単位幅流量の変化を示している。この図より、第1段階から第4段階へと変化するにしたがって、次の段階の破壊を生じさせるための破壊段階間の単位幅流量が大きくなることがわかる。このことは、破壊が進行するにつれて次の破壊段階へと移行しにくくなることを示しており、破壊に伴い法面勾配が緩くなることや各段階の破壊が生じる時には堰の弱い部分が先に破壊し、強度の面から見て、かなり強い部分が破壊されずに残ることが原因であると考えられる。

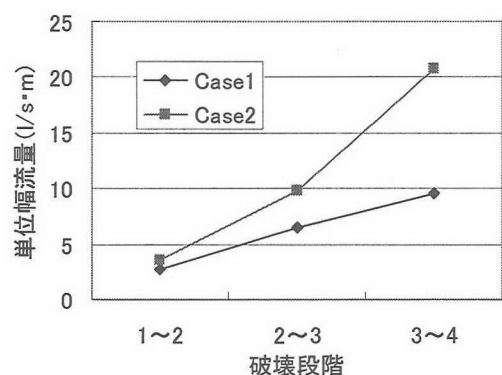
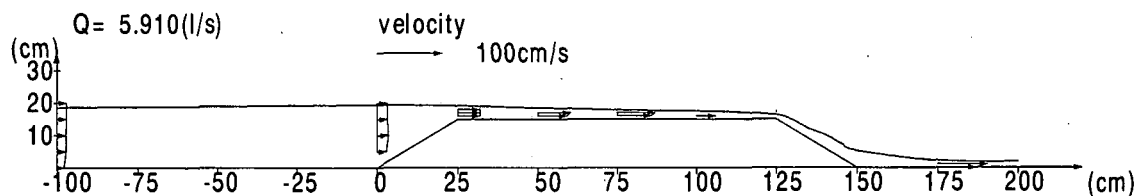


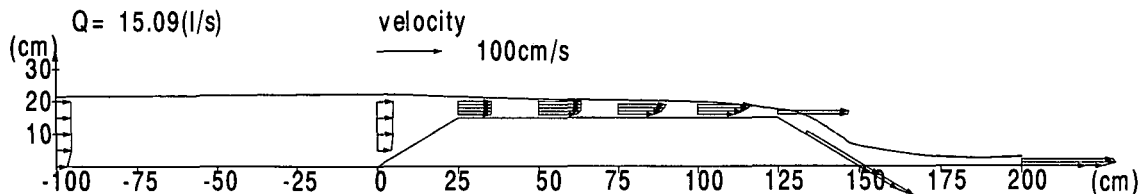
図-6 各破壊段階間の流量の変化

3.3 水面形・流速分布

図-7(a), (b)は、それぞれCase 1およびCase 2について破壊時の水面形および流速分布を示している。また、図-8(a), (b)は25 cm断面から75 cm断面にお

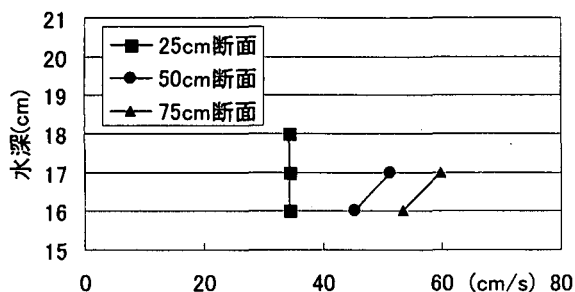


(a) Case 1

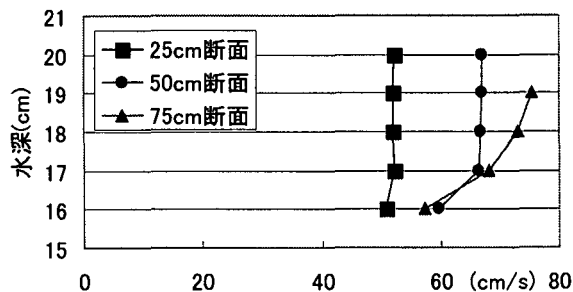


(b) Case 2

図-7 破壊時の水面形と流速分布



(a) Case 1



(b) Case 2

図-8 破壊時の25cm～75cm断面位置の流速

ける破壊時の堰上の流速分布を示している。これらの図より、水面形は通常見られる台形堰のそれとほぼ同様であることがわかる。ただし、Case 1の場合には、第1段階の破壊が生じる流量が少ないことに加えて、流れが捨石堰内を通過するため堰下流法肩上部（125 cm断面）における越流水深はかなり小さくなる。つぎに、流速分布を見ると、25 cm断面では両ケースともほぼ一様に流入しているが、流下するにつれて両ケースとも自由表面付近の流速がかなり大きくなることがわかる。しかし、河床付近の流速は河床面上の石礫による粗度の効果で流速の増加が抑制されている。この傾向は粒径の大きなCase 2の場合に顕著である。

3.4 浸透力特性

図-9および図-11は、図-4で示した間隙水压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。浸透力分布より堰内部における流れの様子を概略を知ることができる。25 cm断面から50 cm断面

についてみると、Case 2の場合の方が若干動水勾配が大きくなること以外は、粒径による大きな違いは見られない。この断面における天端表面付近の浸透力は、堰内部から堰天端上へ向いており、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。一方、河床付近では、浸透力は河床にほぼ平行に作用している。50 cm断面から75 cm断面では浸透力がかなり小さくなっており、通過流量が減少していることが予測される。100 cm断面から125 cm断面にかけては、浸透力が大きくなる。また、法肩に近づくにつれてかなり乱れてくる。下流側法面付近の浸透力は、その方向が大きく2つに分けられる。すなわち、法肩付近の表面にごく近い箇所に見られる水面（浸出面）にほぼ垂直な方向の浸透力と、それよりもやや石礫内部で見られる水面にほぼ平行（流下方向）に向かう浸透力である。水面に垂直な浸透力は、高速流に連行されるように、水面に垂直な方向に向かうものと考えられる。一方、法面に平行な浸透力は法面下端部から流出する流れに連行されているものと考えられるが現段階では明らかではない。堰の破壊は前にも述

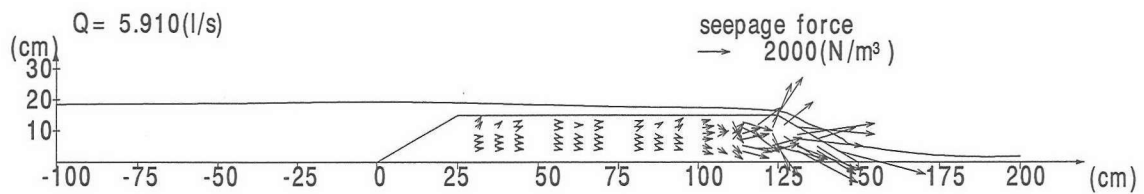


図-9 浸透力分布 (Case 1, 破壊時)

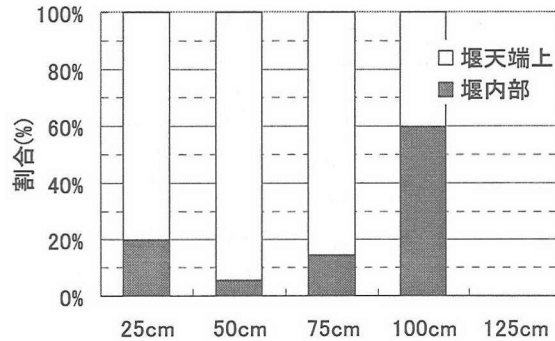


図-10 各断面位置における堰上部と捨石堰内部の流量割合 (Case 1, 破壊時)

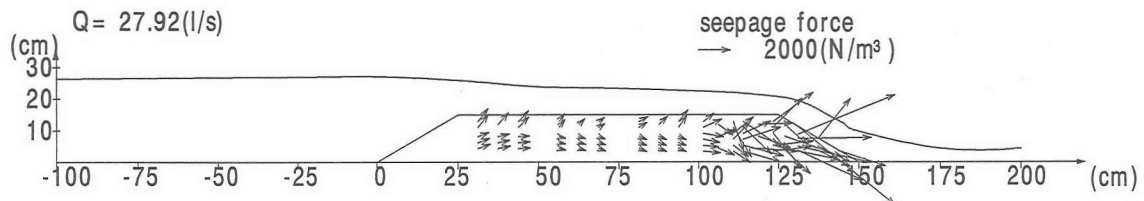


図-11 浸透力分布 (Case 2, 破壊時)

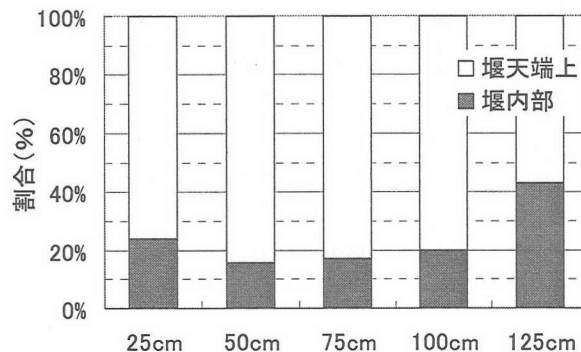


図-12 各断面位置における堰上部と捨石堰内部の流量割合 (Case 2, 破壊時)

べたように堰下流側法面から発生する。石野ら⁵⁾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。

3.5 捨石堰の通過流量特性

ここでは、堰体内の通過流量特性を検討するために以下のようにして堰体内の通過流量を算出した。まず、捨石堰天端上の5つの断面における流速を水深方向に積分することにより堰天端上の各断面流量を

計算し、その後、測定流量との差により、堰内部を通過する流量を算出した。図-10および図-12は、Case 1とCase 2に関して、このようにして得られた各断面における堰天端上の流量と堰内部の流量の配分比率を積み上げグラフで示したものである。この図より、Case 1の100cm断面を除いて、堰材料の粒径が大きくなるほど破壊時の捨石堰の通過流量割合が多くなることがわかる。また、紙面の都合上掲載していないが、上流側水深が同じ場合の流量割合を比較した結果、Case 2の場合の方が堰体内の通過流量が多かった。このことより間隙率が0.4と同程度であっても、堰材料の粒径が大きくなるほど捨石堰

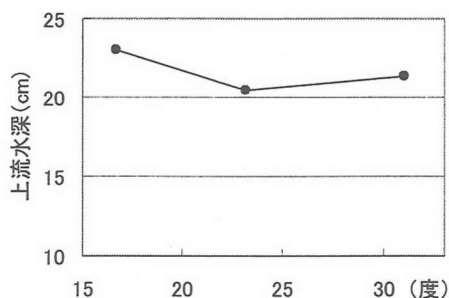


図-13 上流水深と法面勾配の関係

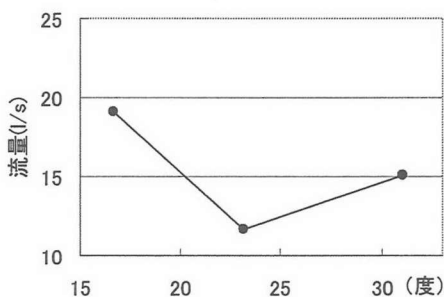


図-14 流量と法面勾配の関係

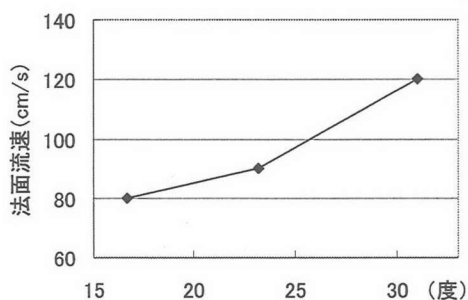
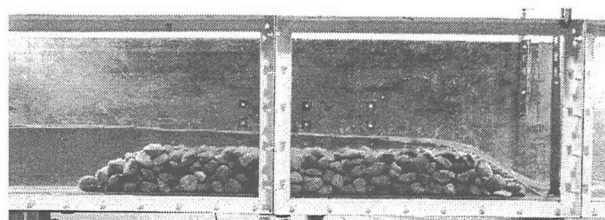


図-15 法面流速と法面勾配の関係

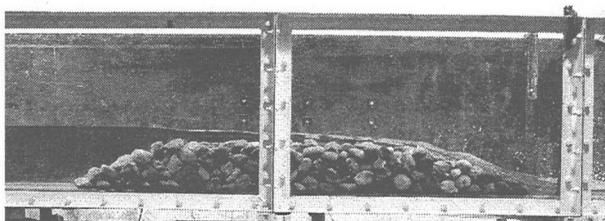
の通水性が良くなることがわかる。つぎに、流量の流下方向への変化を見ると、一度捨石堰に流入した流量は（25 cm断面）、それ以降の断面（50 cm～75 cm断面）において減少するが、堰下流に近づくと共に堰体内の通過流量が増加し、堰下流端付近では堰体内の通過流量が25cm断面における堰体内流量より多くなる。このことは、堰天端において堰体内と堰上の流れとの間で流水が活発に交換されていることを示すものである。図-9, 11で示した、堰天端付近の浸透力が上向きの場合に堰体内流量が減少し、下向きの場合に堰体内流量が増加するというように、浸透力分布によって示された堰体内と堰天端上との間の流水の交換を概略的ではあるが説明できているものと考えられる。

3.6 法面勾配の違いによる破壊時の水理量の変化

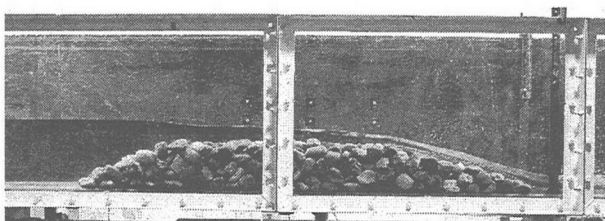
捨石堰の破壊は、下流側法面付近から発生するこ



(a) Case2a, 下流法面勾配 1:1.67(31度)

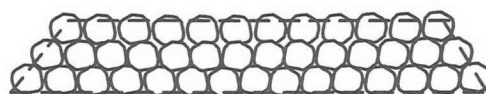


(b) Case2b, 下流法面勾配 1:2.33(23.2度)

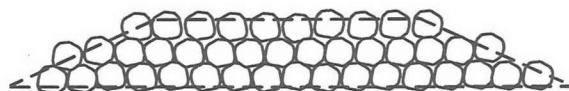


(c) Case2c, 下流法面勾配 1:3.33(16.7度)

写真-5 下流側法面勾配を変化させた堰(Case2)



(a) 噛み合わせの良い例



(b) 噛み合わせの悪い例

図-16 勾配による石礫の噛み合わせの変化

とが前節までに明らかにされた。また、流量の増加に伴って概ね4段階の破壊過程を経て堰下流法面勾配を徐々に緩めながら堰が破壊することが明らかにされた。しかし、初期の下流側法面勾配などの石礫の設置条件の変化が破壊時の水理量にどのような影響を与えるのかについては明らかにされていない。そこで、本節では、粒径が大きいCase 2の場合について下流側法面勾配を変化させて破壊の発生機構を検討する。写真-5 (a)～(c)は、それぞれ下流側法面勾配を 1:1.67(31度, Case 2a), 1:2.33(23.2度, Case 2b), 1:3.33(16.7度, Case 2c))と変化させた場合の破壊時の流況を示している。なお、Case 2aはCase 2の勾配条件と同じである。図-13, 14, 15は各

ケースの破壊時における上流水深、流量、下流側法面中央付近の石礫上における破壊断面付近の流速と法面勾配の関係を図示したものである。この図より、破壊時における上流水深あるいは流量の大小関係と勾配との関係を見ると、法面勾配が最も緩やかなCase 2cの場合にこれらの値が最も大きく、つぎに、法面勾配が最も急なCase 2a、そしてCase 2bの順に小さくなっている。このこと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ることがわかる。一方、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法面上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の一つとなっていることがわかる。さらに、法面勾配の変化に伴う石礫同士の噛み合わせの効果も堰の破壊に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-16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。今後、堰の破壊モデルを提示していくためには、従来のこの種の研究^{5),6),7),8),9)}において取り扱われている手法に加えて、このような石礫間の噛み合わせの影響を考慮した取り扱いが必要になるものと考えられる。

4. 結 論

本研究では2種類の粒径の捨石堰を用いて破壊時の水理特性に焦点を当てて実験的な検討を行った。その結果、得られた主要な結論は以下のようである。

- 1) 捨石堰の水位－流量の関係は不透水性の堰とほぼ同様な傾向を示し、捨石堰の堰上げ効果はかなり期待できる。粒径が大きくなると粒子間に存在する間隙の大きさが増すため同じ流量に対する堰上げ高は小さくなるが、その程度は小さい。
- 2) 堰の破壊は、流量の増加とともに概ね4段階の破壊段階を経て破壊する。
- 3) 堰下流端付近では浸透力が大きくなる。法肩付近の表面にごく近い箇所では法面にほぼ垂直な方向となり、それよりもやや石礫内部では法面にほぼ平行に向かう。
- 4) 捨石堰内部に流入した水は、流入直後は堰上部

の高速流に連行されるように堰上部へ流出し、その後は下流に向かうにしたがって逆に堰内部へ流入する。

- 5) 堰下流法面勾配の変化による破壊実験の結果、法面上の流速の大きさと法面勾配との相関が認められた。

今後は、本研究で得られた成果を基に、破壊機構を説明するための力学モデルを提案していくとともに、最適な法面勾配や下流の裏面部分の処理方法なども含めて検討していく必要がある。

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) 石野和男、関 文夫、田辺 顕：庭園を例とした日本古来の水環境の考察、環境システム研究、Vol.24, pp.686-694, 1996.
- 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、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) 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/Ⅱ-32, pp.123-133, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 伊藤一教、樋口雄一、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年4月19日受付)