

自然石を用いた堰の水理特性

FLOW CHARACTERISTICS OF A WEIR MADE OF NATURAL GRAVEL

前野詩朗¹・道奥康治²・森永 智³・大西利典³

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)

Various impermeable weirs (e.g.; concrete weir) have been constructed across the river for the purpose of water utilization. But it intercepts river flow and causes negative influences to self purification of river water and ecosystem of aquatic biota. Considering these environmental problems, the nature-friendly hydraulic structure made of natural material is attracting the attention in recent years. In this study, the authors focused on a rubble mound weir, and examined its basic hydraulic characteristics. Laboratory experiments were carried out to investigate the flow characteristics for the permeable and impermeable weirs. Investigations were also conducted for pore water pressure distributions through permeable weir and its failure process. This study suggests that permeable weir made of natural gravel would be better than impermeable weir concerning to the control of environmental problem.

Key Words : rubble mound weir, flow characteristics, natural gravel, permeable and impermeable weir

1. はじめに

従来より、河川には多くの堰が利水目的で設置されてきたが、水を最大限利用する必要性から、不透水性の堰構造が多く採用されてきた(写真-1は従来から用いられているコンクリート製の堰の一例である)。これら不透水性の堰構造は、河川の流れを流下方向に遮断し、河川本来の自浄作用を低下させ水生生物の生態系に様々な影響を引き起こしてきた。このような背景のもと、河川環境を保護するために自然に優しい材料を用いた多自然型の川づくりが全国各地で進められており、その中でも不透水性の堰の代用構造物として自然石を用いた堰の利用が期待されている(写真-2は巨石による堰の一例である)。しかし、自然石を用いた堰に関する水理特性には未解明の部分が多いのが現状であり、研究例も非常に少ない^{1), 2)}。本研究は、自然石を用いた堰の実用化に向けての第一歩として、実際の河川(岡山県旭川の中流域)で採取した石礫を堰材料とした台形の堰を作成(以後、この堰を捨石堰と呼ぶ)して、この堰に関する水理特性を実験的に明らかにしようとするものである。このために、まず、同形状の不透水性の堰の堰上げ効果、流速分布などの比較を行い、堰の水理特性の相違点について検

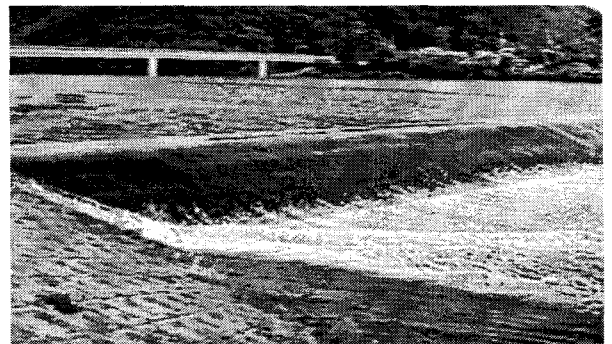


写真-1 コンクリートによる堰(岡山県旭川)

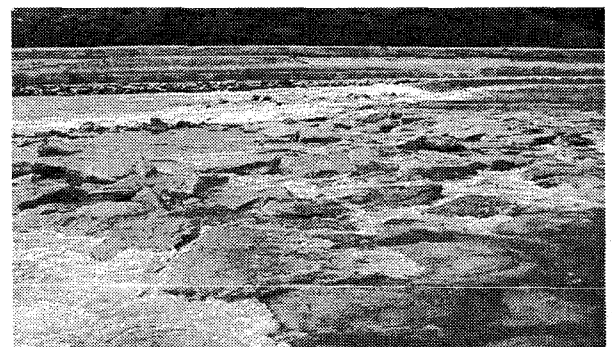


写真-2 巨石による堰(岡山県旭川)

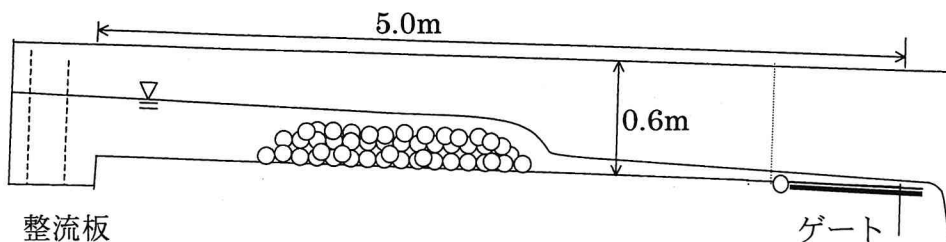


図-1 実験装置

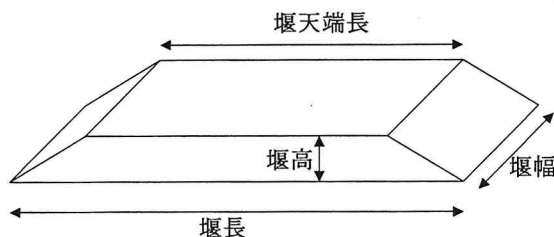
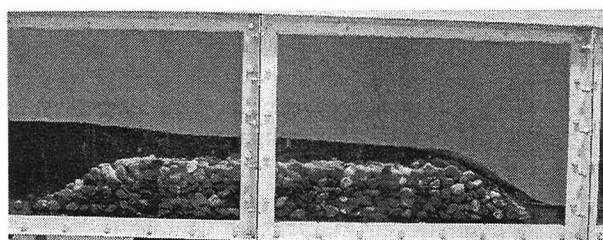


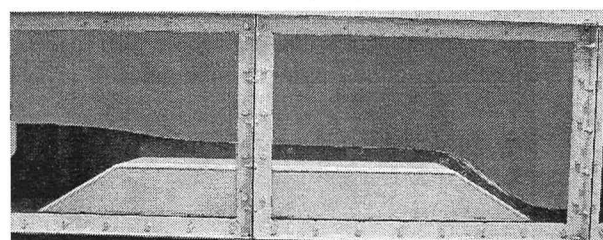
図-2 堰の概略図

表-1 実験条件

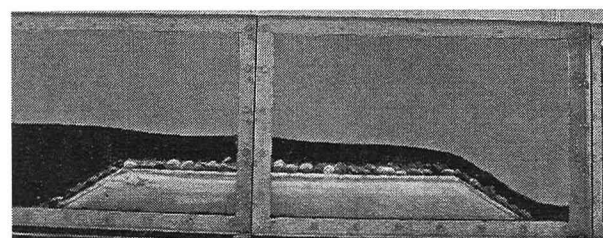
河床勾配	1/100	平均粒径	約3.2cm	堰天端長	1.0m
水路全長	5.0m	堰長	1.5m	間隙率	0.403
水路幅	0.4m	堰幅	0.4m	透水係数	0.184 (m/s)
水路高さ	0.6m	堰高	0.15m	堰法面勾配	1:1.67



(a) 捨石堰



(b) 不透水性の堰 (張り石なし)



(c) 不透水性の堰 (張り石あり)

写真-3 実験で用いた堰

証した。その後、捨石堰内部の間隙水圧を計測し、堰の破壊現象についても合わせて観察を行った。

2. 実験の概要

(1) 実験装置の概要

本研究では、図-1に示すような可変勾配循環水路の中央部分に、捨石堰、不透水性台形堰(張り石なし)および不透水性台形堰(張り石あり)の3種類の堰を設置して実験を行った。なお、各堰の堰高は石礫を含めてほぼ一定になるように設計した。水路後方側面は鋼板、前方側面は厚さ2cmの亚克力板を用いており、現象が可視化できるようになっている。捨石堰は、実際の河川で採取した石礫を台形堰となるようにし、堰最下層の石は水路底面に固定させた。破壊は堰下流側法肩付近から進行していくため、石の固定による破壊への影響は殆どないと考えられる。不透水性の堰(張り石なし)については、ベニヤ板を用いて作成し、張り石ありの堰は、板の上に自然石を張りつけた。それぞれの堰の写真を写真-3に示す。堰および実験装置の概略は、図-2、表-1に示す通りである。なお、この模型のスケールは実物の約10分の1を想定している。流量は、水路下流端と接続している貯水槽に、流量測定用の堰を取り付けて計測した。しかし、流量が過度に少ない場合には堰による測定精度が悪いので、水路下流端で取水し数回の平均を取って流量とした。また、水路上流端には、整流板を設置し、水の流れを安定させた。水路下流端は、自由流出となっているが、流出制御も行えるようにゲートを取り付けた。さらに捨石堰を用いた実験の際には、水路後方側面に図-3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。



図-3 間隙水圧の測定ポイント

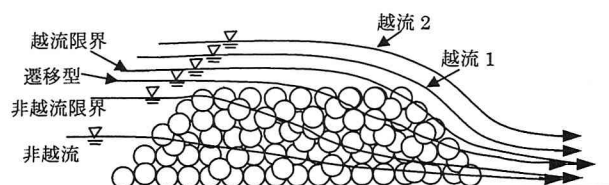


図-4 計測時の流況

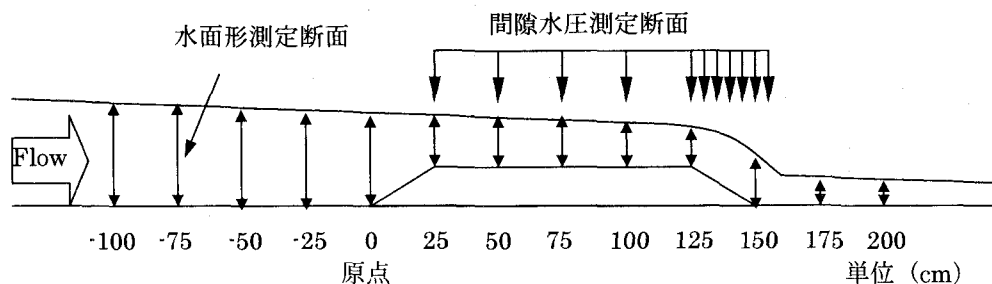


図-5 測定断面（水深，流速，間隙水圧）

(2) 実験条件および実験方法

捨石堰については、その特徴的な流況を取り上げて実験を行った。すなわち、図-4で水深の低い順に、堰の内部のみを通過する非越流、堰上流側法肩で水面が潜りこむ非越流限界、堰天端中央で水面が潜り込む遷移型、堰を越流し始める越流限界、堰を完全に越流する越流1, 2の計6種類の流況である。これらについて水面形、流速および間隙水圧を測定した。なお、堰は越流開始付近から破壊し始めるため、下流側法面に金網による保護工を設置し、堰の破壊が起こらない状況下で測定を行った。また、保護工の金網を撤去して、流量の増加にともなう捨石堰の破壊の様子を2台のデジタルビデオカメラを用いて撮影した。さらに、水面形および流速分布ならびに上流水深と流量の関係について計測した。ここで、上流水深は、堰構造物による局所流の影響がなく、水面が安定している原点（図-5参照）から上流に100cmの堰上流端断面の水深を用いている。

具体的な測定方法は以下の通りである。水面形は、図-5に示す25cmごとの全13断面にてポイントゲージにより測定した。なお、捨石堰において水面が堰内部に潜り込んでいる場合にはポイントゲージによる計測は不可能であったため、側壁アクリル板から可視的に水深を測定した。流速は、ピトー管を用いて河床に平行（法面については、法面に平行）の流速を計測した。流速の測定断面は、図-5に示す断面のうち原点より上流側100cmの位置と、原点より下流側125cmまでの6断面、および下流側法面において法面に平行に2断面の合計9断面について測定を行った。図-3の測定ポイントにおいて、シンフレックスチューブにより計測された間隙水圧は、堰下流側法尻を基準面としたピエゾ水頭に換算した。

3. 実験結果および考察

(1) 流量特性

従来より、道奥ら¹⁾によって捨石堰における流量特性の研究が行われてきているが、非越流の状態を対象

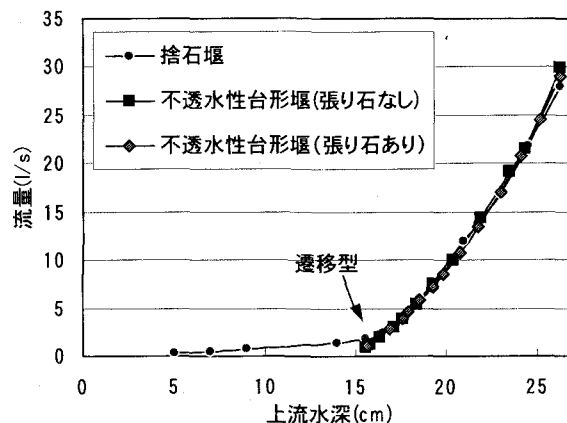


図-6 上流水深と流量との関係

としており、越流時の水理特性は示されていない。そこで本研究は、非越流から越流までを含めた広範な流況に対して、上流水深と流量の関係について検討するものである。図-6は捨石堰、不透水性台形堰（張り石なし）および、不透水性台形堰（張り石あり）の3種類の異なる堰について、上流水深と流量との関係を示したものである。まず、捨石堰では越流水深が15cm以下の非越流の流れでは、流量のわずかな増加に対して水深が増加している。これより、捨石堰によっても低水時の堰上げ効果を相当程度期待できることがわかる。さらに、遷移型の状態を越えたあたりから水深に対する流量増加が急になる。この段階においては、3種類の堰の傾向はほとんど同じであり、特に、完全に越流が始まった遷移型から15 (l/s) くらいまでは傾向が非常に似ていることがわかる。しかし、流量が15 (l/s) を超えたあたりからは、多少の変化がみられる。すなわち、不透水性台形堰（張り石なし）において、わずかではあるが同じ流量を与えた時の堰上高が小さくなっている。また、流量が大きい領域では、同じ流量を与えたときの上流水深が、不透水性台形堰（張り石なし）、不透水性台形堰（張り石あり）、捨石堰の順に大きくなっている。このような現象の確かさを確認するために何度か計測を行ったが同様な傾向が得られた。これらのことから総合的に判断すると、まず、捨石堰では越流後、堰の空隙部分を通過する流量は堰の上部を越流していく流量に比べ非常に少なく、他の2

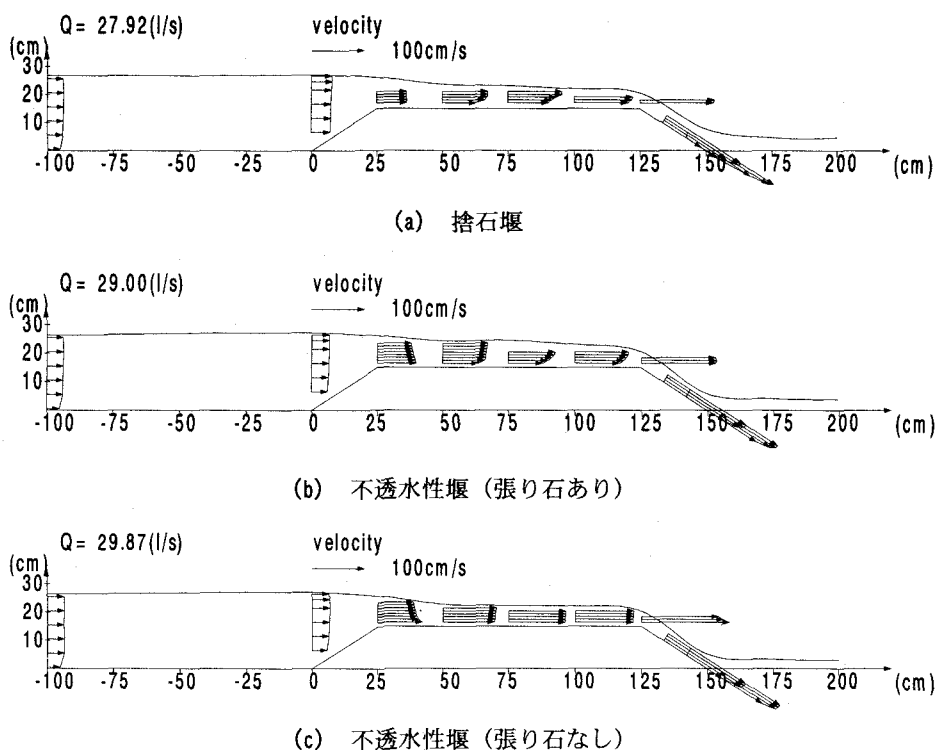


図-7 水面形および流速分布結果

種類の不透水性の堰と同様な上流水深と流量の傾向を示すことがわかった。3種類の堰を比較すると、流量が多くなると堰表面における粗度が大きいほど堰上高が大きくなり、現段階では理由は明らかではないが、条件によっては、捨石堰の堰上高が最も大きくなる場合があることがわかった。今回の実験では粒径の変化による検討を行っていないが、実際の河川において堰を越流する程度の流量が確保されれば、捨石堰も堰上げの効果は十分に期待できるものと考えられる。

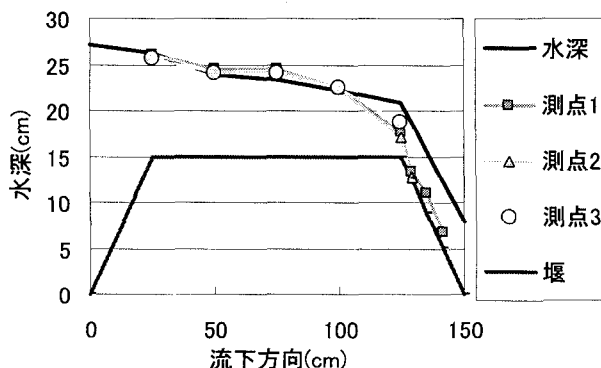


図-8 堰体内のピエゾ水頭

(2) 流速分布特性

図-7(a)～(c)は、それぞれ捨石堰、不透水性台形堰（張り石あり）、不透水性台形堰（張り石なし）の水面形および、流下方向の流速分布を図示したものである（写真-3は、図-7(a)～(c)の計測時の流況を示している）。3種類の異なる堰の流速分布特性を明らかにするために、上流水深をいずれの場合も26.3cm（捨石堰の越流2に相当）に固定している。これらの図から、3つの特徴的な現象が見てとれる。第1番目は、上流側法肩断面（25cm断面）の流速分布である。いずれの堰構造の場合も、上流端断面（-100cm）と上流側法肩断面（原点）の流速分布にはほとんど相違は見られないが、(b)、(c)の不透水性の堰では上流側法肩断面の流速が大きくなり、とくに自由表面付近よりも堰表面近傍の流速の方が大きくなっていることがわかる。これは、上流端法肩で剥離が生じていることが原因として考えられる。その後、幅厚が大きい天端表面近傍

で流速が次第に減速される。このような堰上の流速分布の示す傾向は、吉川ら³⁾により示された幅厚堰上のそれと定性的に一致している。一方、(a)の捨石堰では流速が小さく抑えられ、しかも流速分布が一様である。これは、流体が捨石堰間隙内にも流入し、堰直上の流速が過剰に大きくならないためであると考えられる。第2番目の特徴は、堰天端上の流速に見られる。流速は、(c)の不透水性台形堰（張り石なし）、(b)の不透水性台形堰（張り石あり）、(a)の捨石堰の順に小さくなっている。粗度が小さい(c)では一様な高速流となっているが(a)、(b)の場合には表面粗度の影響により河床面付近の流速の低減が見られる。最後の特徴は、堰天端上の水面形に見られる。(b)と(c)の不透水性の堰を比べると、(b)は表面に粗度を付けているため、(c)よりも水深が大きくなっている。(a)の捨石堰は(b)ほど高くなく、(c)と同程度である。これは、捨石

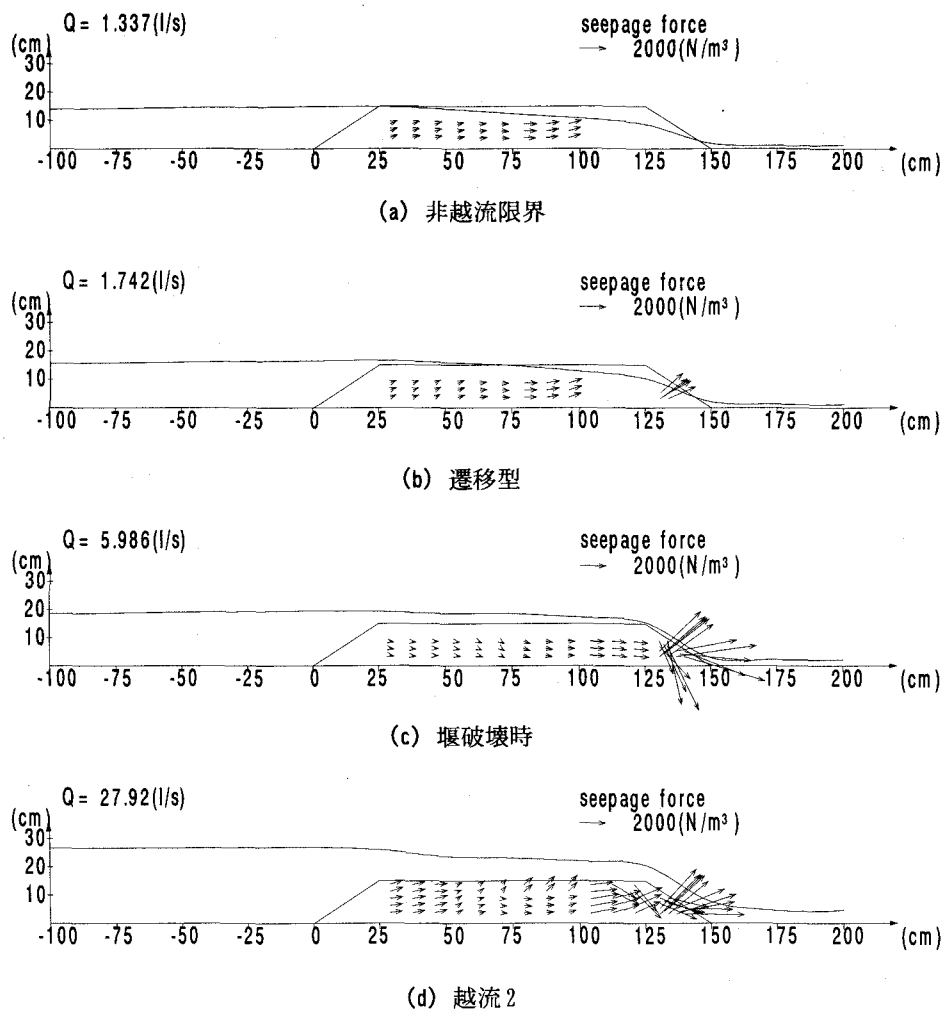


図-9 浸透力分布

堰内部に流水が浸透するため、堰上の水深が低くなったものと考えられる。

(3) 浸透力特性

図-8は、越流2の状態における堰体内のピエゾ水頭を示したものである。この図より、堰下流法肩より上流側の断面におけるピエゾ水頭はほぼ水面形と一致していることがわかる。しかし、堰下流法肩より下流の断面では、急変流によると考えられる圧力減衰が起きているのがわかる。堰体内の流れの特性をさらに詳細に検討するために、本研究では、各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、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、間隙水の流れる方向の概略を検討する。図-9(a)～(d)は非越流限界、遷移型と、遷移型から少し越流した捨石堰破壊時、そして越流2の浸透力分布を示している。これらの図より、以下のことがわかる。

比較的流量が小さい(a)、(b)および(c)においては、浸透力は堰体内の中央くらいまで河床にほぼ平行で、しかも浸透力そのものもそれほど大きくない。浸透力

は、堰体内部を流下するにつれて徐々に大きくなり、堰下流法面近傍では浸透力は著しく増大する。また、その方向は浸出面に向かうようになる。(a)には、この下流側法面の浸透力が見られないが、これは内挿補間による浸透力の算出ができなかったためで、実際はその他ケースと同様に水面に向かう浸透力が存在していると考えられる。次に、流量がかなり大きい(d)の越流2の浸透力分布について検討する。50cm断面までは比較的大きな浸透力の発生が見られるが、75cm断面付近では逆に減衰し、その後100cm断面より下流では再び増大している。この浸透力分布より、一旦堰体内に流入した間隙水は50cmあたりの断面で堰天端から流出していることが考えられる。このような天端から吹き出すような浸透流の状況は、堰間隙内部にトレーサーを流すことによって目視により確かめることができた。また、(c)、(d)のように堰を越流している状況下では、下流側法面の水面にほぼ垂直な浸透力とは別に、下流側法肩付近に、水面(流下方向)にほぼ平行な浸透力が見られる。これは、越流して下流側法面を流下する高速流の影響を受けて、下流側法肩の表面に近

い箇所の浸透流が同方向に向かい、また、それに引っ張られるように河床付近では浸透流が水面に垂直な方向に向かうものと考えられる。次に述べる堰の破壊現象では、堰下流側法面から破壊が始まる。したがって、このような堰体内に発生する浸透流が、堰の破壊の一因となることは容易に推察される。

(4) 破壊の特性

写真-4(a)～(d)は下流法肩部に取り付けた金網の保護工を取り外した時の堰の破壊の進行状況を示したものである。堰の破壊は、越流開始後、まず下流側法面中央付近で石の抜け出しが起これ、その後下流側法面の破壊が進行していく。このことから初期段階の破壊は、(3)で述べた浸透力が影響しており、その後は、越流水による掃流力の影響を増しながら破壊が進行していくものと考えられる。また、これらの写真に示すように、堰の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、段階的に進行することがわかった。すなわち、越流限界を越えるあたりから堰下流部法面付近で第1段階の破壊が起これ、ある程度安定した状況になる。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。

4. おわりに

本研究では、捨石を用いた堰の水理特性を実験的に検討した。その結果、以下のようなことがわかった。

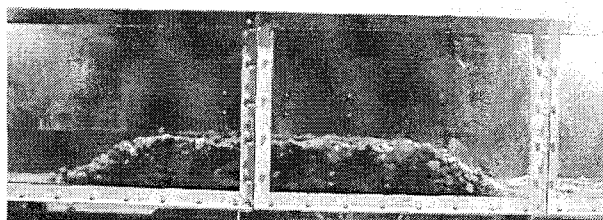
(1) 捨石堰の間隙部分を通過する流量は、堰の上部を越流していく流量に比べ非常に少なく、堰上げの効果は十分に期待できることがわかった。

(2) 堰の表面に粗度を有する捨石堰では、堰天端で水面が上昇し、流速は減速する。このことから、特に堰天端上の流速の小さい箇所などでは、水生生物などの遡上に有効であることが推測される。

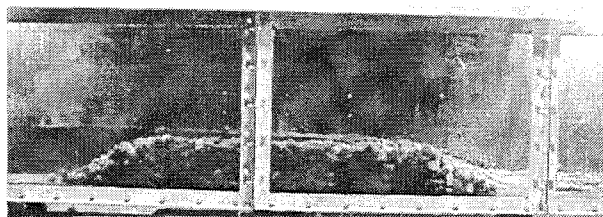
(3) 捨石堰内部の浸透力分布から、破壊初期段階においては、越流水による掃流力だけでなく、下流側法面で水面に垂直に作用する浸透力も影響していることが明らかにされた。

(4) 堰の破壊現象は、連続的に起こるのではなく安定した状態と破壊を交互に繰り返しながら段階的に進行する。

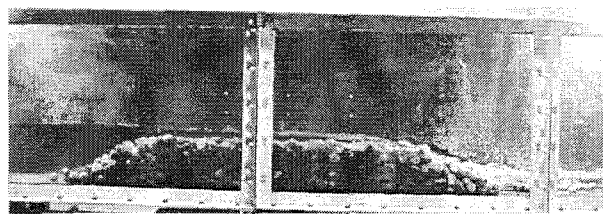
以上の研究により、捨石堰の基本的な水理特性が明らかにされたが、今後は、粒径、堰の形状、堰の大きさなど種々の条件を変えた実験を行い、破壊のメカニズム等を明らかにした上で、実用化に向けて設計手法の確立を図る必要がある。



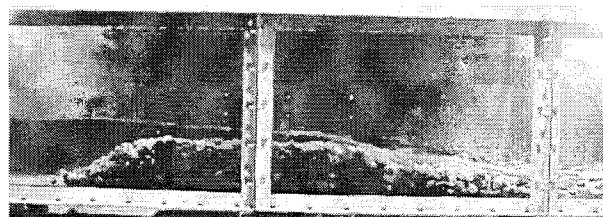
(a) 第1段階の破壊 (流量: 4.8 l/s)



(b) 第2段階の破壊 (流量: 5.9 l/s)



(c) 第3段階の破壊 (流量: 8.5 l/s)



(d) 第4段階の破壊 (流量: 12.3 l/s)

写真-4 破壊の進行状況

謝辞: 本研究の一部は文部省科学研究費補助金、基盤研究(C)(2)(代表: 道奥康治, 課題番号: 12650513)並びに財団法人八雲環境科学振興財団環境研究助成金(代表: 前野詩朗)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) 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.
- 2) 森永智・大西利典・前野詩朗: 捨石堰の水理特性に関する実験的研究, 土木学会中国支部研究発表会概要集, pp. 109-110, 2001.
- 3) 吉川秀夫・芦田和男・土屋昭彦: 幅厚ぜきの流量係数に関する研究, 土木研究所報告, pp. 123-138, 第103号, 1960.

(2001. 10. 1 受付)