

ブロック堰堤に作用する土石流荷重の基礎実験

防衛大学校 ○齋藤 和樹 堀口 俊行

1. 緒言

我が国は、国土の約7割が山地・丘陵地で構成されており、土砂災害が多発しやすい地形条件を有している。令和6年の能登半島地震では、河道閉塞が生じた溪流において、土石流に対する応急対策工としてブロック堰堤が整備された。しかし、同年9月の奥能登豪雨による出水では、一部の土砂を捕捉したものの、上部に設置されたブロックの一部が流出する被害が確認された。

ブロック堰堤の設計では、ブロック群を一体構造として取扱い、不透透型砂防堰堤の設計法を準用することが一般的である。そのため、個々のブロックの移動に伴う挙動、ならびに凹凸を有するブロック相互の噛み合わせによる安定性効果については、必ずしも十分に考慮されていない。特に、ブロック形状の違いが荷重の伝達特性や流出過程に与える影響については、未解明な点が多い。ブロック堰堤に関する既往の研究として、中村ら¹⁾は、凹凸形状のブロックと直方体形状のブロックを用いて、ブロックの積み方が安定性に及ぼす影響を実験で検討した。その結果、水のみが越流する条件では、堰堤の高さ方向に対して千鳥状にブロックを配置することで、堰堤の安定性が向上することを示している。筆者ら²⁾は、寺地川の被災事例を対象に模型実験を行い、ブロックの流出過程を越流による流出とピークを有する流れによる流出の2種類に整理した。しかし、これらの研究では、ブロック堰堤に作用する荷重そのものや、ブロック形状の違いに伴う荷重特性の差異については、十分な検討がなされていない。そこで本研究は、直線水路に凹凸形状ブロックおよび直方体形状ブロックを用いた堰堤モデルを作成し、ブロックの流出過程と堰堤に作用する荷重を実験的に計測するものである。そのうえで、ブロック形状の違い、特にブロック相互のかみ合わせの有無が、作用荷重および流出特性に与える影響について検討する。

2. 実験条件

図-1に実験水路と荷重計測方法を示す。水路は、全長4.5 m、幅300 mm、高さ500 mmの直線水路である。水路底面には、木製の底面粗度(高さ0.5 cm、幅1.0 cm、純間隔2.0 cm)を配置した。河床勾配 θ は、石礫型土石流を想定し、15°に設定した。また、水路上流端には貯水タンクを設け、ゲート操作により水を流下させる構造とした。

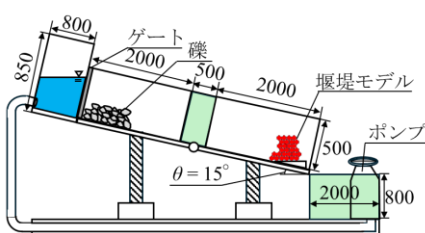
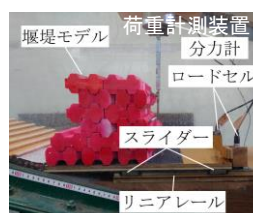


図-1 実験水路と荷重計測の仕組み



荷重計測では、水路流下方向に設置した2本のリニアレール上に木製板を固定し、その上に堰堤モデルを設置した。下流側に100 Nロードセル2基を配置し、さらに堰堤後方に100 N分力計を設置した。

図-2に堰堤モデルを示す。ブロックモデルは、体積と重量が同一の凹凸形状ブロックと直方体形状ブロックの2種類とし、ABS樹脂を用いて3Dプリンタにより作製した。模型縮尺はフルード相似則に基づき1/27.4とした。実構造物におけるブロック重量を4.0 t、コンクリートの単位体積質量を2.3 t/m³と仮定すると、ブロックモデルの相似重量は194 gとなる。図-2(a)に凹凸形状ブロックの堰堤モデル(TYPE_1)を示す。堰堤モデルは、高さ方向に6段、水路幅方向に6個のブロックで構成した。また、流下方向には、1~2段目を3個、3~6段目を2個とし、高さ方向に千鳥状に配置した。図-2(b)に直方体形状ブロックの堰堤モデル(TYPE_2)を示す。TYPE_2についても、堰堤高さがTYPE_1と同様となるよう、同数のブロックを高さ方向に千鳥状に配置した。

土石流材料には、比重1.9の固化石炭灰を用いた。礫径は5-10 mm、10-15 mm、20-25 mmの3粒径とし、各5.4 kg、計16.2 kgを使用した。実験では、まず礫材料を水路上流部に堆積させ、その後方のタンクに水13 Lを貯水した後、ゲートを解放した。また、定常流量3.8 L/sの通水を、土石流が堰堤モデルに衝突する直前まで与えた。なお、土石流条件はTYPE_1の堰堤モデルにおいてブロックが流出しない条件となるよう設定した。

実験ケースは土石流条件1種類、堰堤モデル2種類(TYPE_1, TYPE_2)とし、それぞれについて流出実験および荷重計測実験を実施した。したがって、実験は計4ケースとした。各ケースについては、3回の繰り返し実験を行った。

3. 実験結果

3.1 流出実験

図-3にTYPE_1の流出実験結果を示す。時間は、土石流が堰堤に衝突する直前を $t = 1.0$ sとして整理した。TYPE_1では、最上段の上流側ブロックが土石流の堰上げに伴ってわずかに持ち上がる挙動を示したものの、ブロックの流出は確認されなかった。このことから、凹凸形状ブロックでは、ブロック相互のかみ合わせにより上部ブロックの移動が抑制されたと考えられる。

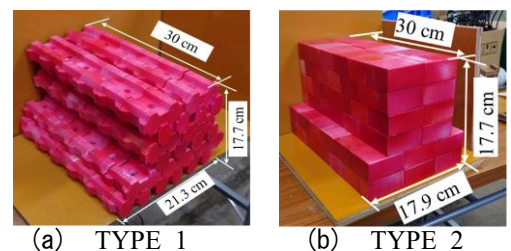


図-2 堰堤モデル



(a) $t = 1.12 \text{ s}$ (b) $t = 1.28 \text{ s}$ (c) $t = 1.57 \text{ s}$

図-3 流出実験 (TYPE_1)



(a) $t = 1.12 \text{ s}$ (b) $t = 1.28 \text{ s}$ (c) $t = 1.57 \text{ s}$

図-4 流出実験 (TYPE_2)

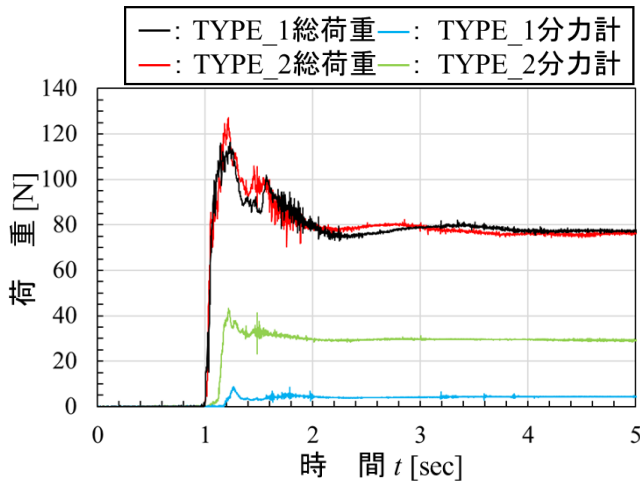


図-5 総荷重～時間関係

図-4 に TYPE_2 の流出実験結果を示す. 同様に, 土石流が堰堤に衝突する直前を $t = 1.0 \text{ s}$ として整理した. TYPE_2 では, 堰堤上部のブロック群が一塊となって滑動し, 下流側へ流出した. さらに, 滑動したブロックの下面に位置するブロックも, これに追従して下流側へ移動した. このことから, 直方体形状ブロックでは, ブロック間の荷重伝達が主として接触面の摩擦に依存しており, 上部ブロックの滑動が下部ブロックの移動を誘発したものと考えられる.

3. 2 荷重計測実験

図-5 に TYPE_1 および TYPE_2 の代表ケースにおける総荷重と時間の関係を示す. ここで, ロードセル 2 基と分力計の合力を総荷重とし, $t = 1.0 \text{ s}$ を荷重の立ち上がり時間として整理した. 図中の黒線および青線はそれぞれ TYPE_1 の総荷重と分力計の荷重を, 赤線および緑線はそれぞれ, TYPE_2 の総荷重および分力計荷重を示す. TYPE_1 および TYPE_2 の最大値は, それぞれ 116 N および 127 N であり, 最大荷重に至るまでの立ち上がり時間も $t = 1.23 \text{ s}$ および $t = 1.21 \text{ s}$ とほぼ同程度であった. 一方で, 分力計により計測された最大荷重は, TYPE_2 が TYPE_1 の約 4.9 倍となった. すなわち, ブロック形状の違いは総荷重そのものよりも, 堰堤内部のどのブロックにどの程度荷重が集中するかという荷重伝達特性に大きく影響していることが分かる. 特に, TYPE_2 では, 上部ブロックに作用する荷重が局所的に大きくなりやすいのに対し, TYPE_1 ではブロック相互のかみ合わせにより荷重が分散された可能性が示唆される.

3. 3 凹凸形状の有無が与える影響

流出実験および荷重計測実験を総合すると, ブロック形状の違いは, 堰堤に作用する総荷重の大きさそのものよりも, ブロック群内における荷重の伝達経路と抵抗機構に大きく影響することが分かる.

TYPE_2 では, ブロック間の荷重伝達は主として摩擦力に依存するため, 上部ブロックに作用した荷重が滑動を引き起こしやすく, その結果として上部ブロック群の一体的な流出につながったと考えられる. これに対して, TYPE_1 では, 摩擦力に加えてブロック相互のかみ合わせによる接触力が作用するため, 特定のブロックに荷重が集中しにくく, 複数のブロックが協調して荷重に抵抗したと考えられる. この解釈は, TYPE_1 では流出が生じなかったこと, また分力計で計測された局所荷重が TYPE_2 よりも小さかったこととも整合する. すなわち, 凹凸形状はブロック上下間および周辺ブロック間の荷重伝達を変化させ, 結果として局所的な荷重集中を緩和し, 堰堤全体としての安定性を向上させる役割を有すると考えられる.

以上から, ブロック形状に応じて荷重に抵抗するブロックが異なることが分かり, 現行設計のブロック全体が荷重に抵抗する前提は再検討していく必要がある. また, ブロック堰堤の安定性は, 堰堤全体が一体として荷重に抵抗するかどうかではなく, ブロック形状に応じて, どのブロックが, どのような経路で荷重を負担するかに強く依存することが示された.

4. 結 言

本研究では, 凹凸形状および直方体形状を用いたブロック堰堤モデルについて, 流出実験と作用荷重の計測実験を行い, ブロック形状が流出特性および荷重特性に及ぼす影響を検討したものである. 以下に, その成果を示す.

- 1) 凹凸形状ブロックでは, ブロック間のかみ合わせによる荷重伝達により, 直方体形状ブロックに比べて多くのブロックが協調して荷重に抵抗し, 安定性が向上することが確認された. 一方, 堰堤全体に作用する総荷重の最大値は, ブロック形状によらず概ね同程度であった.
- 2) ブロック形状の違いは総荷重そのものよりも, ブロック群内の荷重伝達経路および局所的な荷重集中に強く影響することが示された.

今後は, 再現解析を通じて, ブロック群内の荷重伝達機構をさらに詳細に検討する.

参考文献

- 1) 仲村達也ら: コンクリートブロック積み砂防堰堤の機能性に関する実験的検討, 令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集, P-146, 2023.
- 2) 齋藤和樹, 堀口俊行, 高原晃由: 能登半島豪雨災害を踏まえたブロック積砂防堰堤の連続的な崩壊に対する簡易補強法の検討, 砂防学会誌, Vol.78, No.6, pp.3-10, 2026