

## 大型水路を用いた木製治山えん堤内の石礫の侵食耐性実験

### Experiments on resistance of boulder to erosion in wodden chisan-dam in large-scale flume

岡田康彦<sup>\*1</sup>・石川芳治<sup>\*2</sup>

Yasuhiko OKADA<sup>\*1</sup> and Yoshiharu ISHIKAWA<sup>\*2</sup>

\* 1 森林総合研究所水土保全研究領域

Depart. of Soil and Water Conservation, For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

\* 2 東京農工大学大学院農学研究院

Institute of Agric. Tokyo Univ. of Agric. and Techno., Fuchu 183-8538

**要旨：**小段差を複数有した多段型治山えん堤において中詰め石材に侵食が発生する臨界の条件を明らかにすることを目的に、全長 20m、幅 1m、高さ 1m の大型水路に木製の治山えん堤模型を設置し水流を与える実験を実施した。水路自体の傾斜は 5 度に設定し、水路途中からは水平方向に水を流した時、0.30m もしくは 0.45m に設定した段差下の石礫に侵食が発生する条件を調べた。計測項目は、流量および段差から 150mm 上流側における水深である。石礫のサイズは、63mm 篩残留 78mm 篩通過、78mm 篩残留 102mm 篩通過、102mm 篩残留 120mm 篩通過の 3 種類である。水流の流量を変えて実験を繰り返したところ、侵食が発生する際の中詰め石礫の粒径は、単位幅、単位時間に流れた水の運動エネルギーに比例することがわかった。また、無次元パラメータ  $\Pi$ （石礫に載荷される掃流力に関する物理量と、石礫の重力に関する物理量の比の平方根）は、粒径によらず 1.4～1.7 程度に収束することがわかった。この結果を基に、現地渓流で推定される水流に対し、侵食を発生させない石礫の最小粒径を推定することが可能となった。

**キーワード：**木製治山えん堤、石礫の侵食耐性、大型水路

**Abstract :** The resistance of boulder to erosion was examined in a wooden chisan-dam model set-up in a large scale flume (20 m long, 1 m wide, and 1 m height). The water flowed on a horizontal plane before falling into the chisan-dam model that was situated 0.30 m or 0.45 m below the plane. A gradient of the flume base was set at 5 degrees. The flow rate and flow height 0.15 m up stream of the step was measured. Three sizes of boulder were used in the experiment. Kinetic energy of the water flow per unit width and time was calculated by flow heights and velocities measured when the erosion took place. The kinetic energies linearly correlated to the diameter of boulder and only small differences were found between the experiments with the step of 0.30 m and 0.45 m. A non-dimensional parameter ( $\Pi$ ) that is square root of the ratio of tractive force to gravity of boulder converged between 1.4 and 1.7 irrespective of the diameter of boulder, making it possible to determine the sizes of boulder in order to prevent erosion when they will be setup in the mountain streams.

**Keywords :** wooden chisan-dam, resistance of boulder to erosion, large-scale flume

#### I はじめに

国土の多くを急峻な山地斜面が占める我が国では、山地斜面環境を保全し、土砂流出を軽減するなどの目的で治山事業が実施されてきている。近年はこれまでに観測されたことの無いような集中豪雨が頻発していることから、合理的かつ経済的な治山構造物を設置して国民の安全・安心に資することが望まれている。渓流に設置される治山えん堤には、大きく分類して遮水型、透水型、透過型の 3 種がある(2)。これらの中、透過型の治山えん堤は、渓床堆積物の連続性を保ち生態系への影響を可能な限り減少させることを意図したものとして分類される。他方、コンクリートの使用を極力抑え、天然材料を使用した治山対策を推進する方

法の 1 つとして木製の治山えん堤も設置されてきており、木材の腐朽特性の調査が進められている。生態系への影響を抑え、かつ、コンクリートの使用を排した治山えん堤として、多段式の木製治山えん堤(図-1)の実用化の可能性が模索されている。このえん堤の外側は木材で出来ているが、えん堤の内部は石礫で中詰めされる。各段差を 0.3m から 0.5m 程度とすることにより魚類の遡上を可能とする他、えん堤下流側の侵食を抑制することができ、洪水や土石流による損壊を軽減し、耐久性を高める効果があると期待されている。

他方、段差下の中詰め石礫が落下水流により侵食されてしまうと下流への土石流出の悪影響がおよぶ他、木

製えん堤の維持管理の観点からいっても問題となる。つまり、多段式の木製治山えん堤の設置を検討する渓流で想定される流速、流量に対し、侵食が発生しない中詰め石礫の大きさを事前に決定する必要がある。そこで、大型水路に多段式の木製治山えん堤模型を設置し、中詰め石礫のサイズを3種類に変えて実験を行い、水流を種々に与えた場合に中詰めの石礫に浸食が発生する臨界の条件を調べた。

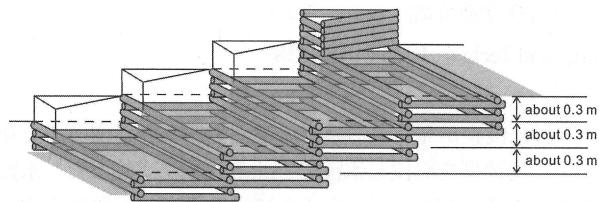


図-1. 多段式の木製治山えん堤の模式図。  
Fig. 1 A schematic diagram of a multi-step type wooden chisan-dam.

## II 実験概要・条件

実験に用いた大型水路は、全長が20m、幅は1m、高さ1mの鋼鉄製(1)(図-2)で、下流側12.6mは両側面とも強化ガラス製として水路内部の様子を確認可能な仕様となっている。水路はスクリュージャッキ方式により0度から7度まで勾配を変化させることができ。本研究では水路自体の傾斜を5度に設定して実験を実施した。水路下流側末端から16.9mおよび17.1mの位置には、直径20mmの穴を中心間隔30mmで千鳥足状にあけた整流目的の多孔板を取り付けられている。水路末端から22mの位置にJIS規格の鋸縁矩形ノッチを備えた量水槽から水流を発生させる。量水槽への給水は、馬力が90kW、流量が毎分15m<sup>3</sup>、揚程23mのポンプを使用した。貯水容量300m<sup>3</sup>の地下水槽から12mの高さにある容量30m<sup>3</sup>の高架水槽へ揚水さ

れ、高架水槽からは直径0.40mの給水配管を自然落下して量水槽へ供給される。この給水配管に流量計を設置して流量を計測した。水路を流下した水は水路末端下の沈砂槽、地下に備えた環流管を経て上述の地下水槽へ環流させる構造となっている。

水流を与えた場合の中詰め石礫の侵食耐性を検討するため、水路の内部に0.30mもしくは0.45mの段差を与えた木製治山えん堤模型を設置した(図-3)。段差下の石礫の侵食条件を検討するため、2段に作製した治山えん堤模型の上段側の表面はベニヤ板で覆い、下段の治山えん堤模型内に水流が流下する仕様としてある。ベニヤ板で覆った上段治山えん堤模型の上面(水平)方向に鉄板を連結して上流側へと伸ばし、5度傾斜の水路底面と接する箇所でなめらかに連結した。

実験に供した石礫のサイズは、水路幅が1mであることを考慮して、63mm 篩残留 78mm 篩通過(平均粒径71mm), 78mm 篩残留 102mm 篩通過(平均粒径90mm), 102mm 篩残留 120mm 篩通過(平均粒径111mm)の3種とした。実験で与える水流については、給水配管の開閉バルブの開放量をコントロールすることにより流量を変化させ、段差から150mm 上流側の地点で水深を鋼製尺で計測した。小さな流量から実験を開始して侵食発生の有無を確認し、侵食が発生しなかった場合には流量を上昇させるという作業を繰り返した。一気に侵食が発生した場合は、流量を少し下げ、侵食が発生する臨界の条件を検討した。なお、侵食発生の判定について、水流の影響により石礫が全体的に下流側へ僅かに移動する状態や沈むような状態では侵食発生とは判定せず、特定の石礫にすべりや回転による周囲と較べて明らかな相対移動(一粒径程度)が認められた時、侵食が発生したと判定した。

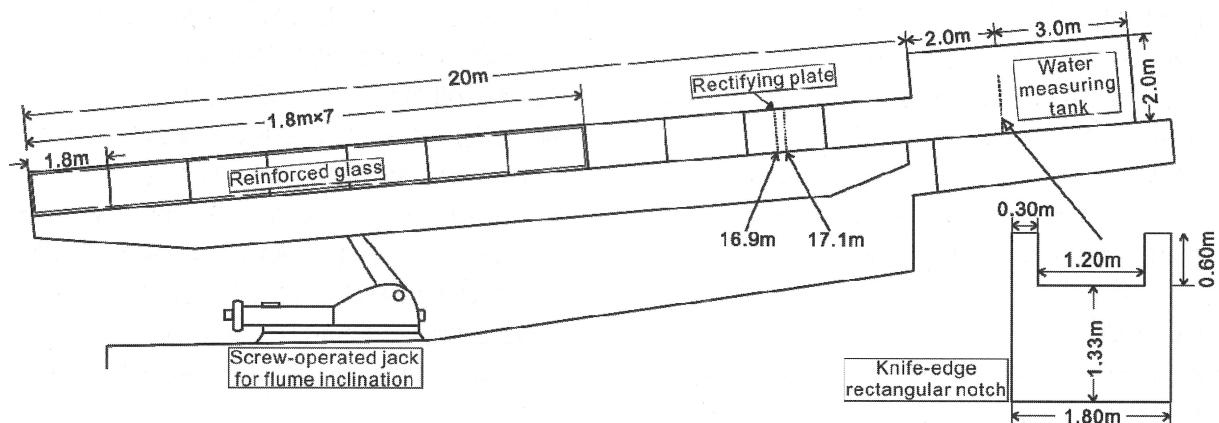


図-2. 石礫の侵食耐性実験に使用した大型水路の側面図および鋸縁矩形ノッチ正面図  
Fig. 2 A side-view of the large-scale flume and a front view of the knife-edge rectangular notch

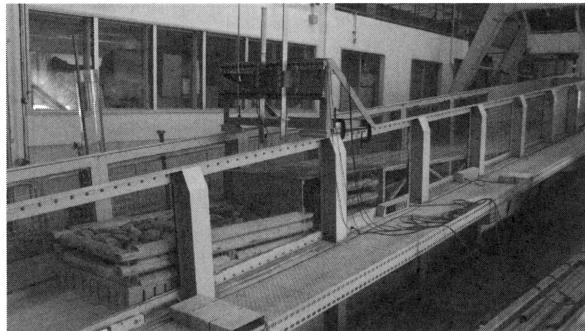


図-3. 大型水路に設置した木製の治山えん堤模型と中詰材の石礫。

Fig. 3 A wooden chisan-dam model setup in the large-scale flume and boulder inside the chisan dam.

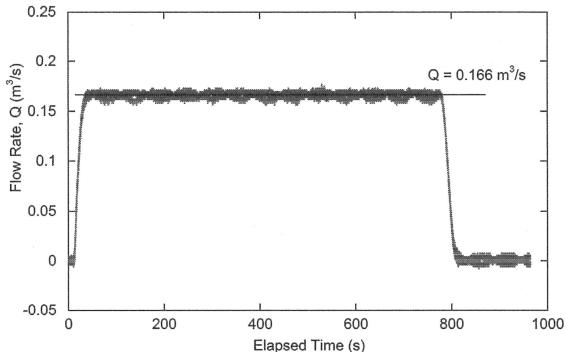


図-4. 計測された流量の経時変化の一例 (0.45m 段差, 平均粒径 111mm の石礫の侵食実験)。

Fig. 4 An example of time series data of flow rate (in an experiment with a step of 0.45m on boulder with average diameter of 111 m)

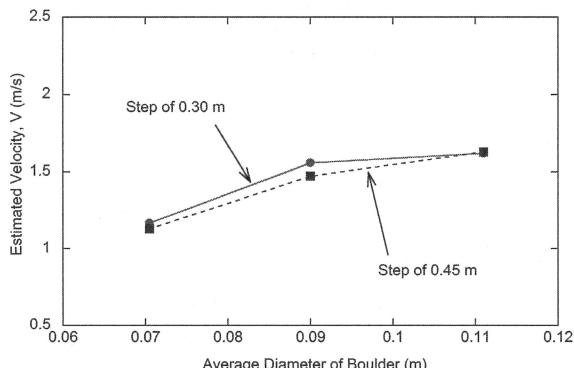


図-5. 流量と水深より推定した侵食発生臨界の平均流速と中詰め石礫の粒径の関係。

Fig. 5 A relationship between average flow velocity estimated based on flow rate and flow height and average diameter of boulder.

### III 実験結果および考察

水流を与えたときに計測された流量の経時変化を図-4に示す。流量がほぼ一定となる状態で10分程度実験を継続し、中詰め石礫の侵食状況を確認した。

段差を0.30mに設定した条件では、平均粒径71mm, 90mm, 111mmの石礫に関して流量が0.056m<sup>3</sup>/s, 0.109m<sup>3</sup>/s, 0.165m<sup>3</sup>/sの時侵食が発生した。段差を0.45m

に設定した条件では、同様に流量が0.062m<sup>3</sup>/s, 0.106m<sup>3</sup>/s, 0.166m<sup>3</sup>/sの際に侵食が生じる結果が得られた。また、これら6回の実験における水流の水深は、0.048m, 0.070m, 0.10m(以上, 0.30m段差), 0.055m, 0.072m, 0.10m(以上, 0.45m段差)となった。水路の幅は1mであることから、流量を水深および水路幅の1で除した平均流速( $V$ )と粒径の関係を図-5に示す。この図から、中詰め石材の粒径が大きいほど侵食が発生するに十分な水流の流速が大きくなること、0.30m段差の実験の方が、0.45m段差の実験における流速値よりもやや大きくなる傾向が認められた。しかしながら、最も両者に差が認められた平均粒径が90mmの両実験においても、0.30m段差の流速が0.45m段差の流速の1.06倍に留まっており、両者には大きな差が認められなかつたと解釈することも可能である。

算出された流速を石礫に接触する直前の水流の水平方向成分とし、0.30mもしくは0.45m自然落下することに伴い発生する鉛直方向成分をベクトル和して絶対値を算出した段差流下速度と平均粒径の関係(図-6)を確認すると、0.45m段差の実験における流速が、0.30m段差の実験よりも相当量大きな値を示している。このことから、0.45m段差の石礫に接触する直前の段差流下速度は大きな値となるが、石礫を鉛直下方向に押しつける成分が大きく、石礫の侵食の発生には水平成分がより影響を及ぼすことが示唆された。

中詰め石礫が侵食するかどうかについては、水流の運動エネルギーと関係すると考え、単位幅、単位時間に流れる水流の運動エネルギーを以下の式で算出し、中詰め石礫の粒径との関係を調べた(図-7)。

$$E = \gamma_w \times Q \times 1 \times V^2 / 2g = \gamma_w \times V^3 \times h / 2g$$

ここで、 $\gamma_w$ :水の単位体積重量(N/m<sup>3</sup>),  $Q$ :流量(m<sup>3</sup>/s),  $V$ :流速(m/s),  $g$ :重力加速度(m/s<sup>2</sup>),  $h$ :水深(m)である。

その結果、0.30m段差、0.45m段差の双方に関して、侵食が発生する水流の運動エネルギーと中詰め石材の粒径についてほぼ等しい正比例関係が認められた。つまり、木製治山えん堤を設置しようと検討する渓流の流量と水深を用いて運動エネルギー $E$ に対し、図-7の関係式を用いて対応を検討することにより、侵食が発生しないための中詰め石礫の最小粒径が推定可能となった。

他方、模型実験の結果の整理は、規模による影響を無視できるため無次元パラメータにより検討されることが多い。中詰め石礫が侵食に抵抗する重力に関係する

物理値 ( $g \times D^3$ ) (ここで,  $D$ : 石礫の粒径) を分母に、石礫に載荷される水流の力に関する物理値 ( $D^2 \times V^2$ ) を分子とする無次元パラメータを考える。

$$\Pi^2 = \frac{D^2 \times V^2}{g \times D^3}, \quad \Pi = \frac{V}{\sqrt{g \times D}}$$

この無次元パラメータと侵食が発生する臨界の石礫の粒径の関係(図-8)を見ると、無次元パラメータ値は、少しバラツキはあるもののおおよそ 1.4 から 1.7 の間に収束することがわかった。この結果からは、木製治山えん堤を設置する渓流の流速に対し、無次元パラメータ  $\Pi$  の値が最大でも 1.4 となるように中詰め石礫の粒径  $D$  を決定することにより、中詰め石礫の侵食が防止されることが示された。

本報は、大型水路に治山えん堤模型を設置して実施した侵食実験の結果を考察したものである。実際の現地渓流に木製治山えん堤を導入するための指針を示すことが望まれているので、水路実験で得られた結果の適応性や限界について検討する必要がある。これらは今後の検討課題としたい。

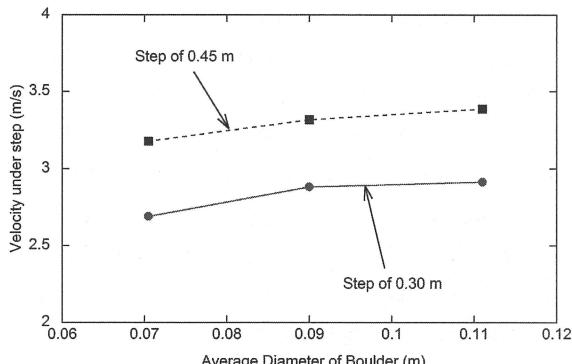


図-6. 侵食が発生する臨界時における、推定平均流速(水平成分)と段差を流下することに伴う鉛直成分のベクトル和による段差下の流速。

Fig. 6 Critical velocity of erosion under the step that is the resultant vector of estimated velocities (horizontal component) and vertical component generated due to the flow through the step.

#### IVまとめ

段差が 0.30m および 0.45m の多段式の木製治山えん堤模型内の中詰め石礫の侵食耐性を調べた。石礫は平均粒径 71mm, 90mm, 111mm の 3 種類を用いた。給水配管で計測した流量、0.30m もしくは 0.45m 段差の 150mm 上流側で計測した水深および流量から算出した平均流速を用いて、侵食が発生する臨界の単位幅、単位時間に流れた水流の運動エネルギーを算出して石

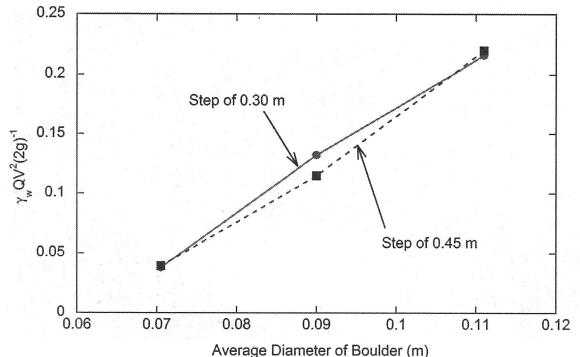


図-7. 侵食が発生する臨界時における単位幅、単位時間に流れた水の運動エネルギーと石礫の粒径の間に認められた比例関係。

Fig. 7 A proportional relationship of kinetic energies of the flow water per unit width and time in the critical conditions of erosion to the average diameter of boulder.

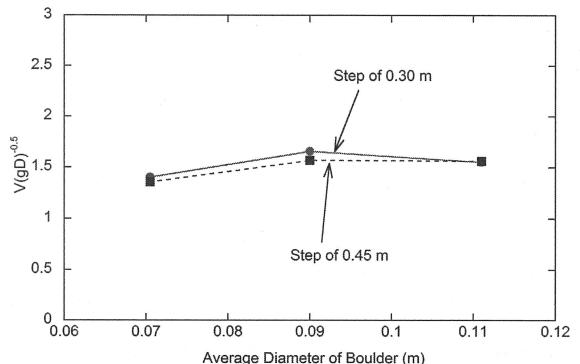


図-8. 侵食が発生する臨界の無次元パラメータ ( $(V(gD)^{0.5})$ ) と石礫の粒径の関係。

Fig. 8 A relationship between a non-dimensional parameter ( $(V(gD)^{0.5})$ ) in critical conditions of erosion and the average diameter of boulder.

礫の粒径の関係を調べた所、両者には正比例関係が認められた。また、両段差の実験結果には大きな差がなく、この程度の大きさの段差であれば一つの関係式で整理されることがわかった。

無次元パラメータ  $\Pi$  (石礫が受ける掃流力と重力の比の平方根) と中詰め石材の粒径の関係を調べたところ、侵食が発生する臨界の  $\Pi$  値は石礫の粒径によらずおおよそ 1.4 から 1.7 の間に収束することがわかった。木製治山えん堤の設置を計画する渓流の流速が分かれれば、 $\Pi$  値を最大でも 1.4 にする石礫の粒径を決定することにより侵食を防止可能と考えられる。

#### 引用文献

- (1) 志水俊夫・菊谷昭雄・河野良治・真島征夫 (1979) 溪流水理実験水路の概要、日林誌 61:294-298
- (2) 社団法人日本治山治水協会 (2009) 平成 21 年版 治山技術基準解説 総則・山地治山編。新和印刷株式会社、東京 : 352pp