

石組みを利用した減勢工に関する実験から 実務への適用とその成果

EXPERIMENTS ON ENERGY DISSIPATOR WITH ROCK COMBINATIONS AND ITS PRACTICAL APPLICATION

安田陽一¹
Youichi YASUDA

¹正会員 博士（工学）日本大学教授 理工学部土木工学科（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8）

This paper presents the efficiency on the installation of continuous rockwork girdles in the energy dissipator below the check dam with a compound cross section through the experimental investigation and its practical application. For the stability on the continuous rockwork girdles during flood stages, the rock combination as in the case of natural mountain-stream is significant. The experiment reveals that the stability of rocks during flood stages depends on the rock combination. It has been confirmed from the capture of transformed gravel stones and drift woods around check dams after big floods that the installation of continuous rockwork girdles below the check dam is effective. Also, swimming fishes can be seen in the continuous rockwork girdles after big floods.

Key Words: Rockwork girdle, Rock combination, Flood stages, Energy Dissipator, Check dam

1. はじめに

山間部の森林保全の一環として、溪畔林の保護、山脚固定、不安定土砂の抑制を目的に治山堰堤が整備されている。そのほとんどが不透過型堰堤であるが、森林率の増加¹⁾に伴い、土砂や砂礫の発生頻度、輸送土砂量が減少し、堰堤下流側の河床低下による岩盤の露出、河床の粗粒化に伴うアーマー化などが発生している。その結果、河川に生息する水生生物の生息、移動、産卵、避難環境の確保が厳しくなっている^{2), 3)}。これらの対策の一つとして、既設の堰堤のスリット化または複断面化が行われている⁴⁾。スリット化または複断面化を実施するときに、堰堤前後の河道の断面形状をスリットまたは複断面の開口形状に合わせて施工することが多い（写真-1）。このため、中小洪水によって、流れが拡散することなく、開削断面を集中して流れるため、掃流力が増大し、堰堤下流側で過剰な河床低下や露岩の形成が生じる（写真-2）。また、堰堤上流側で不安定な土砂を捕捉することなく、下流側に流出し、局所的な堆積による氾濫を招くことになる。さらには、不連続性が解消することなく平水時には水生生物の移動、生息、産卵の妨げにもつながる。

治山の機能を維持し、水生生物の移動を継続するため

には、堰堤前後の河床の整備が必要不可欠となる⁵⁾。自然河川に見られる石が組み合わさった状態は水生生物の生息や移動、洪水時の河床の安定性に優れ、河床整備技術への導入が有効であると考えられる⁶⁾。しかしながら、石組みを考慮した河川整備は手法として確立していない。その結果、城壁の石組み、庭石の配置が多く、平水から洪水流に対応できる石組みができていないことが多い。

ここでは、河川の中で安定する石組みの仕組みとその組み立て方法、および石組み周辺の流れの再現性を確立するために、自然河川に見られる石組みに着目し、その石組みの構成に基づき実験的に検討した。すなわち、滑面開水路に5種類の石組みをそれぞれ設置し、石組みをしたものが滑動する直前の流体力を運動量方程式から間接的に評価し、石組みの組み合わせによって、安定性が大きく異なることを定量的に示した。北海道庁水産林務部林務局治山課の協力のもとで治山整備ならびに魚道整備事業に適用し、治山堰堤の施工現場3か所で技術指導の上で施工を行い、施工後の経過観察を行った。2016年8月には、台風が3度続けて北海道に上陸し、その影響を受け、大量の砂礫・流木が発生したが、不安定土砂および流木を減勢工区間で捕捉し、機能性が損なうことがないことを確認した。台風通過後にも遊泳魚の生息・移動が確認できた。



写真-1 複断面形状に合わせて河道整備が行われた事例



写真-2 河道を狭めたことによって河床低下した事例

2. 石組みによる流体力の違い

石組みによる流体力の違いを検討するため、図-1に示されるように水平水路に石を設置し、流量を増加させ、石が動き始める直前の流体力を検討した。この場合、横断方向に石の接点を多く保つように、石を一様に並べている(写真-3)。石を設置した前後の断面を流入断面、流出断面として、その断面間の流体を検査部を選び(図-2)、運動量方程式(1)を適用する。運動量補正係数を考慮するため、流入断面および流出断面の流速を測定する。

$$\beta_2 \rho Q V_2 - \beta_1 \rho Q V_1 = \frac{1}{2} \rho g B h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g B h_2^2 - D \quad (1)$$

ここに、 B は水路幅(40 cm)、 D は設置した石に作用する流体力、 h_1, h_2 は流入・流出断面での水深、 V_1, V_2 は流入・流出断面での断面平均流速、 β_1, β_2 は流入・流出断面での運動量補正係数である。

石1個を水平に置いた場合の設置面積 A については以下のように定める。具体的には、横断方向に並べた8個中代表的な石を3つ選び、短辺と長辺との積を平均したものを個数分として水平に設置した総面積 A としている。

短辺 × 長辺

$$a_1 = 6.2 \times 7.5 = 46.5 \text{ cm}^2$$

$$a_2 = 6.6 \times 7.5 = 49.5 \text{ cm}^2$$

$$a_3 = 4.9 \times 9.3 = 45.57 \text{ cm}^2$$

$$\text{平均 } \bar{a} = 47.19 \text{ cm}^2 = 0.004719 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ 列あたりの設置総面積 } A = 8 \text{ 個} \times \bar{a} = 0.03775 \text{ m}^2$$

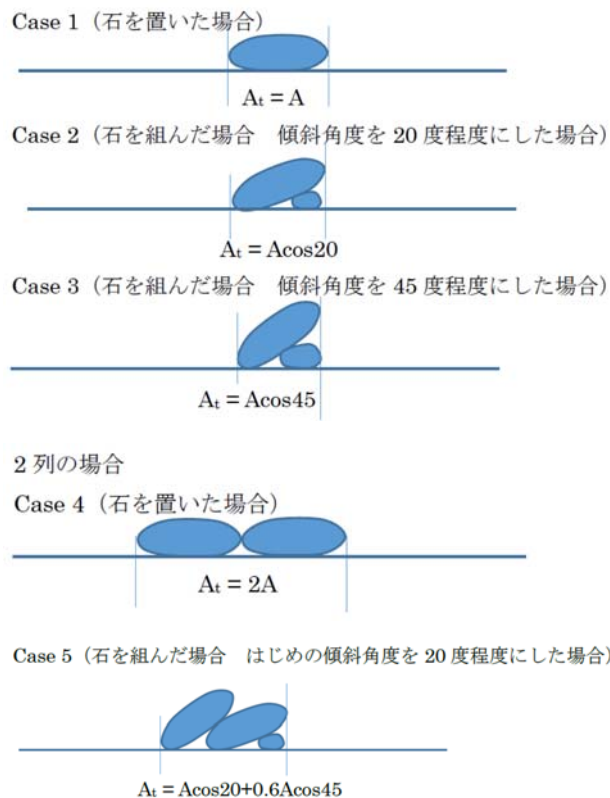


図-1 水平水路に設置した石の状態(概略図)

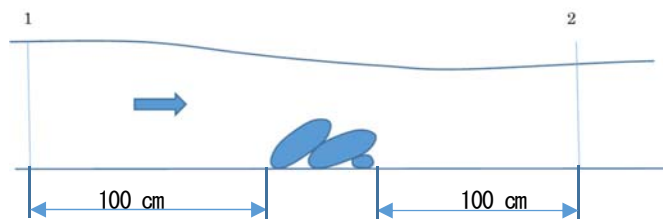


図-2 石に作用する流体力を評価するための検査部



写真-3 水路中に横断方向に石組みした石を設置した状態

石を設置した前後の流速分布を図-3~5に示す。石を水平に並べた場合(Case1)および石を45度に傾けた場合(Case3)の石組み下流側では、測定断面内の最大流速が底面付近に位置する(図-3, 5)。小石を下に敷いて石を20度程度傾けて石組みをした場合(Case 2)、および下流側の石の傾きを20度にし、上流側の石を傾き45度程度にして下流の上流の石でかぶせた状態で石組みをした場合(Case 5)、最大流速が上方に位置する(図-4)。

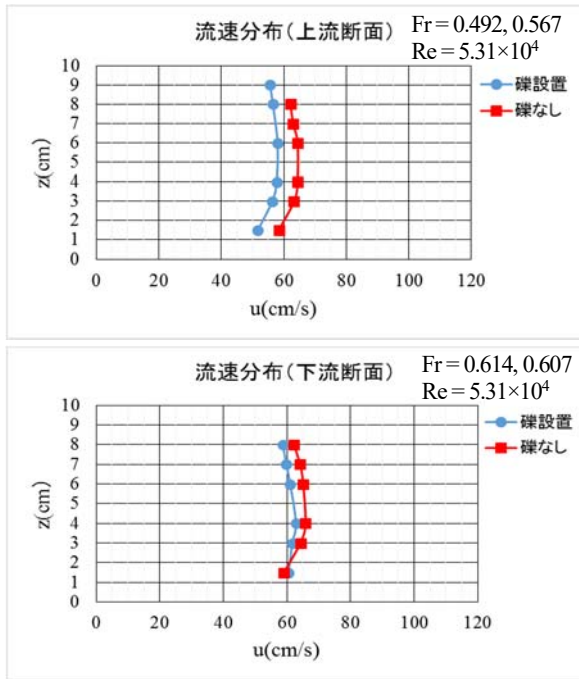


図-3 流入・流出断面の流速分布 (Case 1)

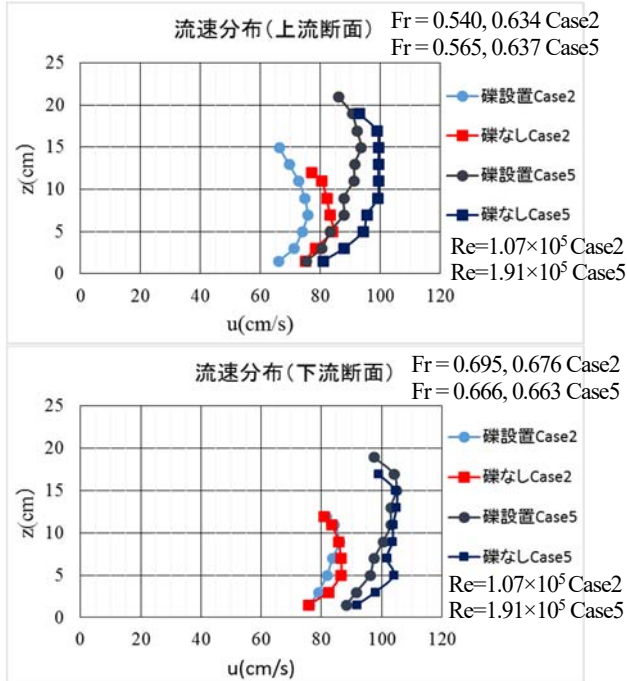


図-4 流入・流出断面の流速分布 (Case 2, Case 5)

各Caseの石が動き始める直前の流体力を比較するために、無次元化された限界掃流力として次式から算定する。

$$\tau_{*c} = \frac{D}{\rho g \left(\frac{\gamma}{w} - 1 \right) S A_t} \quad (2)$$

S は水平に投影した石の高さ、 γ は石の単位体積重量、 w は水の単位体積重量、 A_t は石の設置投影面積である。なお、流体力 D は運動量方程式(1)から算出する。

Case 1 $\tau_{*c} = 2.42 \times 10^{-1}$, $Re = 5.31 \times 10^4$, $Q = 0.0212 \text{ m}^3/\text{s}$

Case 2 $\tau_{*c} = 4.07 \times 10^{-1}$, $Re = 1.07 \times 10^5$, $Q = 0.0430 \text{ m}^3/\text{s}$

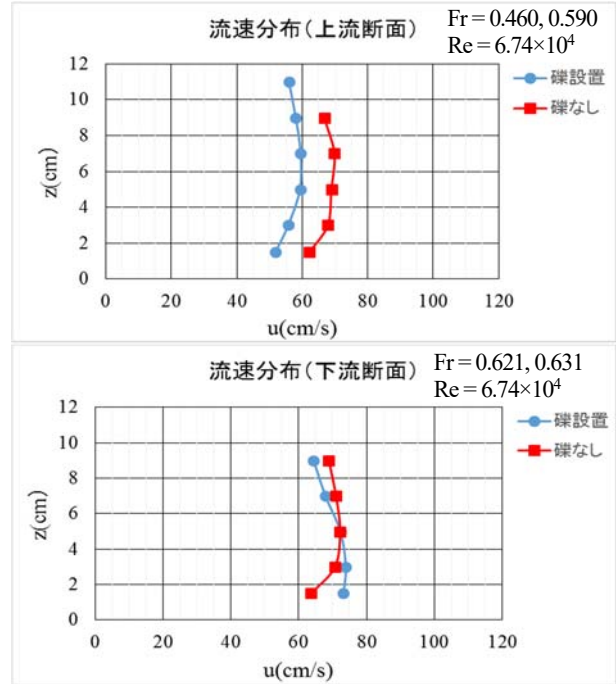


図-5 流入・流出断面の流速分布 (Case 3)

Case 3 $\tau_{*c} = 3.70 \times 10^{-1}$, $Re = 6.74 \times 10^4$, $Q = 0.0270 \text{ m}^3/\text{s}$

Case 4 $\tau_{*c} = 1.48 \times 10^{-1}$, $Re = 8.44 \times 10^4$, $Q = 0.0338 \text{ m}^3/\text{s}$

Case 5 $\tau_{*c} = 3.50 \times 10^{-1}$, $Re = 1.91 \times 10^5$, $Q = 0.0763 \text{ m}^3/\text{s}$

上記の結果から、石組みの仕方でも無次元掃流力が大きく異なる。なお、 $Re (= q/\nu : q = \text{単位幅流量}, \nu = \text{動粘性係数})$ はレイノルズ数を示す。石を水平に1列並べた場合(ただし、石同士の接点は保たれた状態)(Case1)に比べて同じ1列でも小石を下にして並べている石を20度程度傾けて石組みをした方(Case2)が1.7倍も安定性が高まることを示した。また、石を45度程度に傾けると(Case3)、石を水平に並べた場合に比べて1.5倍程度になる。

流量規模で比較すると、石を水平に1列並べた場合に比べて、同じ1列でも小石を下に敷いて横一列に並べている石を20度程度傾けて石組みをした場合、流量が2倍になる。また、石を45度程度に傾けると、石を水平に並べた場合に比べて1.3倍程度になる。すなわち、横一列に並べている石を20度程度傾けて石組みをした場合が45度程度に傾ける場合より安定性が高い。

石を2列(ただし、石同士の接点を保たれた状態)に設置した場合、下流側の石の傾きを20度、上流側の石を傾き45度程度にして下流の石を上流の石でかぶせた状態で石組みをすると(Case5)、石を水平に並べた場合(Case4)に比べて、無次元掃流力は2.4倍も大きくなり、石組みの安定性が高まる。流量規模では2.6倍も異なる。なお、本実験の最大流量でも移動しなかった。

以上の実験結果から、石の組み方次第で石の安定性が異なることを確認した。以下の章では、Case 2, Case 5に示す石の組み方に基づき、治山堰堤下流側の石組みによる帯工を実施した事例を示す。



(a) 河道整備した直後の河床の状態



(b) 出水後の河床の状態

写真-4 河道幅を平水時の3倍程度にした堰堤間の河床
(河道幅 15~30 m, 河床勾配 1/30)

3. 複断面型治山堰堤周辺の河川整備

写真-1, 4は治山堰堤を整備したときの河道整備例を示す。写真-1はスリット幅に合わせ、河道幅を平水時程度の幅にした場合であり、写真-4は河道幅を平水時の3倍程度にした場合を示す。河道幅を平水時程度の幅にした場合、増水時に冠水幅が広がらず、輸送土砂および流水が集中して流れやすくなるため、写真-2に示されるように、河道幅を平水時程度の幅にして整備が行われた結果、河床低下が見られる。その一方、写真-4(b)に示されるように、河道幅を平水時の3倍程度にした場合、出水後、河床低下は発生せず、河道が安定する。

4. 石組みによる減勢池および帯工の設置

複断面を有する治山堰堤の場合、複断面となっているため、中小洪水時には通水断面の制約が大きい増水時に洪水流および輸送される礫の集中が懸念される。安田らによって、スリット化された治山堰堤を対象に、掘り込み型の減勢池を設け、その下流側で石組みによる帯工を設けることで洪水時の流れが制御され、スリットによって集中した流れが分散されやすいこと⁷⁾を実験的に明らかにしている(写真-5)。実験結果に基づき、写真-6に示すように、堰堤直下流では掘り込み型の減勢池(5.5m幅)を設け、その下流側では河床勾配1/34の河道に石組みによる帯工を5m間隔で4列程度設けている。写真-7に示した現場では施工直後に昨年の台風通過に伴う記録的な豪雨が発生したが、堰堤下流側の河道が安定し、ヤマメを中心とする固有種の生息が確認されている。堰堤下流側の石組みについては、石組みの安定性を実験的に検討したように、70 cm~1mの巨石を設置する場合に、



写真-5 治山堰堤下流側の減勢工に関する実験模型



(a) 施工された掘り込み型減勢工（スリット幅 2.5m）



(b) 施工された石組み帯工（帯工幅 10~13 m）

写真-6 実験結果に基づき施工された堰堤下流側の減勢工



写真-7 記録的豪雨通過後の減勢工付近の河床の状態



(a) 掘り込み型減勢池下流端を兼ねた石組みの施工



(b) 巨礫で石組みした上流面を間詰めした状態



(c) 石組み帯工間を間詰め施工した状態

写真-8 堰堤下流側の石組みの施工状態



写真-9 施工後1年目の状態 (上: 7月, 下: 12月)



写真-10 施工後1年目の出水直後の状態 (8月)



写真-11 施工後2年目の状態 (6月)

20～30cm 礫を下に敷いて、図-1のCase 2のように20度前後巨石が傾くように設置し、巨石の接点が3点以上結合するように、重機を用いて調整している(写真-8)。また、巨石の安定性を高めるために、0～40 mmの碎石を用いて間詰めをし、水締めしている。

5. 河道拡幅および石組み帯工の整備による効果

写真-9～11は掘り込み型減勢池および石組みによる帯工を設置(施工)した後の堰堤周辺の経過状況を示す。掘り込み型減勢池の下流端は石組みの帯工によって施工されている。施工された減勢池は輸送砂礫によって堆積する前の段階では流れの減勢をするためのものであり、堆積する前の初期段階として重要な機能を持っている。掘り込み型減勢池の下流側では、掃流力を考えて、前述のとおり、70 cmから1 m規模の巨石を用いて石組みの帯工を設置している。ここで使用した巨石は割石を使用している。帯工間の落差が20 cm程度となるように、自然地形に合わせて間隔を定め、水通し幅に基づいて帯工が設置されている。このことによって、水生生物の移動の妨げにはならない^{3),6)}。また、石組みによって、横断方向に不規則な凹凸が得られるため、流れの強弱が付き、流量規模の変化にも対応できる。出水時では、連続した帯工間の落差が小さいため、中小洪水規模から水面に沿



写真-12 施工後3年目の状態 (2016年10月)



写真-13 写真11の上流側の状態 (2016年10月)



写真-14 写真11の上流側（最上流堰堤）の状態 (2016年10月)



写真-15 写真11の下流側の状態 (2016年10月)

う流れが形成されやすい。その結果、2016年、北海道の日高周辺で台風が連続して通過し、増水に伴う大量の土砂、砂礫が流出したが、帯工間および堰堤上流側で捕捉され、河床低下は見られなかった（写真-12～15）。この現場では、複断面型治山堰堤が10基、設置され、上

流部の7基で発生した大量の土砂、砂礫、および流木を主に捕捉していた（写真-12～14）。なお、捕捉区間では石組み帯工は流されず、帯工の大半は埋没した状態となっていた。また、出水後、平水時の流量に回復し、巨礫の設置によって局所流が形成され、水深が確保されたため、ヤマメの生息が確認できた。

6. まとめ

施工実績に基づき、複断面を有する治山堰堤を整備するときに同時に行われる河道整備による影響を示した。特に、河道幅の拡幅の重要性を示すことができた。また、模型実験規模で石組みした場合と石組みをしない場合の掃流力の比較を検討した結果、石組みの仕方でも洪水時に発生する石組み下流側の洗掘を抑制することが可能となり、安定性が高まる可能性を示すことができた。実験結果に基づき、河道の拡幅、掘り込み型減勢池の確保、堰堤直下流の石組みによる帯工を複断面型治山堰堤およびスリット化された治山堰堤の下流側で整備することによって、洪水時の流れの制御、河床低下の防止、および輸送土砂の捕捉を確認した。さらに、洪水流によって輸送された砂礫が捕捉された中でも、局所流の形成によって水深が確保され、平水時の流量に回復した河道においてヤマメの生息が確認できた。

謝辞

北海道庁水産林務部林務局治山課との共同研究の一環として、日高振興局管轄内に整備された複断面有する治山堰堤、空知振興局管轄内に整備されたスリット化された治山堰堤を通して、提案した減勢工の有効性を検証することができた。ここで記して謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) 2011 国際森林年のねらい、林野庁、www.rinya.maff.go.jp/j/kaigai/2011iyf.html, (2017.03.2閲覧)。
- 2) 安田陽一：技術者のための魚道ガイドライン、コロナ社、144 pages, 2011。
- 3) 安田陽一：生態系保全と治山・治水との調和のとれた河川環境、フォレストコンサル、森林部門技術士会、No.138, pp.7-22, 2014。
- 4) 水山高久、阿部宗平：スリットを有する砂防ダム土砂調節機能に関する検討、土木研究所資料、1990。
- 5) 福留脩文他3名：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計、土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.490-503, 2010。
- 6) 安田陽一：河川整備の土木技術から見た通し回遊性の水生生物の保全に向けた貢献、海洋と生物 225, 生物研究社、Vol. 38, No. 4, pp.387-396, 2016。
- 7) 安田陽一、長沢研作：杉山公裕、スリットえん堤下流側の石組み連続帯工による減勢機能、平成27年度砂防学会研究発表会、6-16, B-224, 2015。

(2017. 4. 3受付)