H3-10

低落差部に設置する緩傾斜型連続石組み帯工群の水理に関する実験的検討

Experimental investigation on hydraulics in mild gravel slope with continuous stone-bridges installed in low drop

○平岡大貴[1]，安田陽一[2]
*Daiki Hiraoka[1], Youichi Yasuda[2]

Abstract: In this report, the authors proposed the installation of mild gravel slope with continuous stone-bridges in low drop by considering flood control and continuity of multi-aquatic animals around hydraulic drop structure. The experimental results on velocity distributions and water surface profiles yield that the existence of horizontal part due to first stone-bridge and the cross section shape with a trapezoidal mild slope might be effective for flood control. In addition, the proposed structure might be helpful for both upstream and downstream migrations of multi-aquatic animals under normal stage of river.

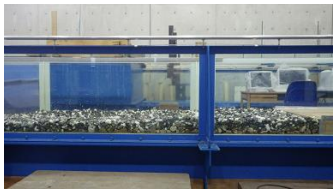
１．はじめに

河床の洗掘低下を防止し，河床を安定化させ，河川の縦横断形状を維持するため，土砂の堆積地帯で洪水流による流路の偏向・浸食，土砂の再生産防止を図るために河川を横断して落差を伴った床固め工が設置されている場合，河床低下に伴い落差が生じた場合などでは，落差直下流部で洪水流の減勢対策が必要となる．また，水生生物の移動が可能にするためには魚道整備が必要である．洪水時の河床保護対策として，水叩きと護床工が設置されている[1]．しかしながら，水理条件によっては，落差構造物直下に跳水を形成させるために必要な下流側水深が確保できず，護床工よりも下流側で跳水が形成され，局所洗掘や河床低下が引き起こされた事例がある．また，洪水時の跳水位置の安定化を図った掘り込み型減勢工[2]も有効な手段であるが，落差がある以上は魚道整備が必要である．魚道内の構造および魚道からの流れ込みの状況によっては迷入する可能性がある[3]．ここでは，落差が 2 m 以下の落差部を対象に，落差部下流側を全面的に緩傾斜面とし，石組みによる連続帯工によって斜面を安定化させた構造を提案し，洪水時の水理特性について実験的に検討した．

２．低落差帯工群による緩斜面減勢工の提案

緩傾斜型連続石組み帯工群による減勢工の一例を **Photo 1** に示す．提案した構造の特徴を以下に示す．

- 平常時から豊水時にかけて緩傾斜面を水生生物が遡上できるように，斜路式魚道の実例[4]に基づき，緩傾斜の勾配を約 1/20～1/30 としている．
- 緩傾斜面では，洪水時の斜面の安定性を強化するために，1 m（原型換算値）規模の巨礫を自然渓流で見られる石組み状とした帯工を設置し，帯工間には中礫・大礫・巨礫を設置する．
- 帯工の設置状態として，落差部の天端と第 1 帯工の天端（最高位）が同一になるように帯工を配置し，落差部から第 1 帯工までの距離を 3 m（原型換算値）程度とする．帯工が巨礫によって構成されているため，平水時および豊水時には巨礫同士の谷間から主に流れることが推定される．この場合，洪水流によって落差部と第 1 帯工の間に掘り込みのプールが形成されることが期待される．落差部で水面差が生じるものと推定されることから，水生生物の遡上するために必要なプール長さとして 3 m（原型換算値）とした．
- 第 1 帯工以降の帯工間の落差は原型規模で 10 cm から 20 cm 程度に収まるように配置する．勾配が 1/20 の場合，最大 4 m（原型換算値），1/30 の場合，最大 6 m（原型換算値）とする．帯工間の長さを大きくとると，洪水流によって形成される掘り込みによって，中小洪水時に波状水面を伴った流れが形成されるため，底面付近の流速の加速減速により礫が掃流されやすい環境になるので注意が必要である．
- 横断面形状については緩傾斜型の台形とする．流量規模によって冠水幅が変化することによって，多様な流れが形成され，平水時から豊水時にかけて水生生物が遡上しやすい経路を選ぶことができる．洪水時では，断面形状の影響で主流を側岸から離れた位置にすることが可能となる．また，主流の位置が上方に上がりやすい．



1) side view

2) bird view from upstream

3) statement of continuous stone-bridges

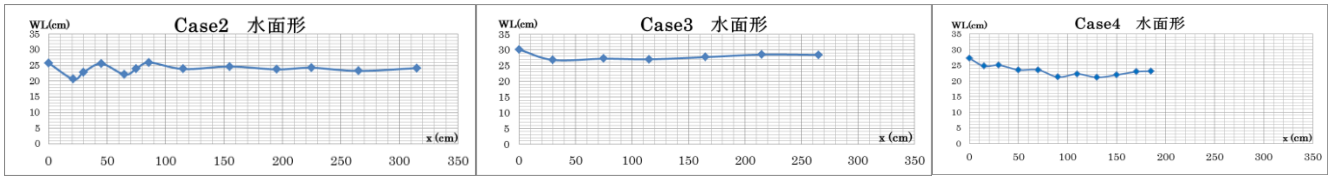
Photo 1. The installation of mild gravel slope with continuous stone-bridges

Table 1. Experiment conditions

Case	Q (m^3/s)	S (cm)	dc (cm)	S/dc (-)	I (-)	設置区間
Case1	0.112 m^3/s	7.0	12.6	0.556	1/28.6	320 cm
Case2	0.0540 m^3/s	7.0	7.75	0.903	1/28.6	320 cm
Case3	0.112 m^3/s	7.5	12.6	0.595	1/18.7	320 cm
Case4	0.0540 m^3/s	6.2	7.75	0.800	1/23.3	320 cm

dc：限界水深($=\sqrt[3]{q^2/g}$)
q：単位幅流量
I：緩傾斜区間の勾配
S：落差部天端から緩傾斜直下流側の河床の天端までの鉛直落差

１：日大理工・学部・土木，２：日大理工・教員・土木



1) S/dc=0.903, I = 1/28.6　　2) S/dc=0.595, I = 1/18.7　　3) S/dc=0.800, I = 1/23.3

Figure 1. Water surface profiles for stream-wise direction

３．実験方法

1/10 scale model の模型実験を想定して検討を行った．また，実験は Froude の相似則に基づいて行い，水路幅 80 cm，水路長さ 15 m，水路高さ 60 cm（水路下流部の高さ）を有する矩形断面水平水路に **Photo 1** に示す落差模型および礫を設置した．実験条件を **Table 1** に示す．なお，下流水位の設定については，相対落差が S/dc=0.903 のときに帯工設置区間では疑似等流が形成され，その下流部では露出射流が形成されないように水路下流端のゲートで水位を調整した．落差模型の寸法は高さが 10 cm，幅 80cm，流下方向の長さが 100 cm である．落差部下流側に使用した礫は混合粒径の礫であり，3～5 mm の礫と 10～30 mm の礫である．また，石組み帯工として粒径が約 100 mm のホワイトストーンを使用した．なお，河岸の形状を整形するために，底層部を中心に 40～60 mm の礫を使用し，中層から表層にかけて 3～5 mm，10～30 mm の混合粒径によって整形した．緩傾斜面の勾配は約 1/30（測定結果 1/28.6），約 1/20（測定結果 1/18.7，1/23.3）とし，下流側の礫層の厚さは約 3 cm である．

水深の測定にはポイントゲージを用い，流速の測定には，ケネック社製プロペラ式流速計を用いた(計測時間 20 秒，1 秒間のパルス数の平均値を計測)．水深および流速の測定箇所について，帯工設置区間の減衰状況を調べるため，帯工上部，および帯工と帯工との中間を測定した．

４．落差部下流側の水面形状

Case 2～4 の水路中央部での水面形状を **Figure 1** に示す．相対落差高さ S/dc = 0.903，緩傾斜勾配 I=1/28.6（Case 2）の場合，第 1 帯工の天端が落差部天端より 1.6 cm 低くなっているため，相対落差が同程度(S/dc = 0.800)である Case 4 の場合と比べて，緩傾斜勾配が小さいにも関わらず落差部からの流れが下向きになりやすく，また凹凸が大きくなるため，第 1，第 2 帯工間での底面付近の流速が大きくなり，掃流されやすい状態になっている．第 1 帯工の天端と落差部天端がほぼ水平とした S/dc = 0.595(**Figure 1** 2))の場合，図に示されるように，主流は水面に沿った状態になるが，水面の凹凸は小さい．

５．落差部下流側の流速分布

S/dc = 0.595, I = 1/18.7 **の場合**(Case 3)**および** S/dc = 0.800, I = 1/23.3 **の場合**(Case 4)の流下方向成分の流速の水深方向変化をそれぞれ **Figure 2**, **3** に示す．**Figure 1** 2),3)に示されるように，落差部の終端から第 1 帯工までの区間では，落差部からの流れの向きが下向きとなっているため，主流は下方に位置するが，第 1 帯工の天端を落差部の天端に揃えたこと，帯工を横断方向に台形状にしたことにより，第 2 帯工より下流側では主流は上方に位置する．また，側壁付近の流速は小さい．すなわち，河岸侵食の軽減につながることが推定される．

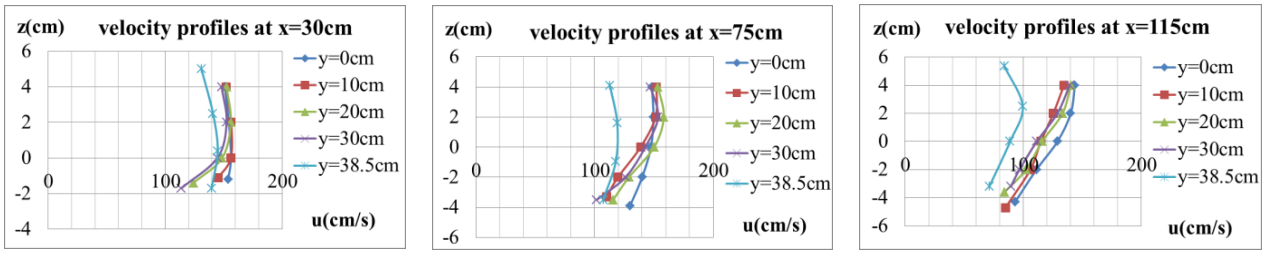


Figure 2. Velocity profiles of stream-wise component at each section for S/dc = 0.595, I = 1/18.7 (Case3)

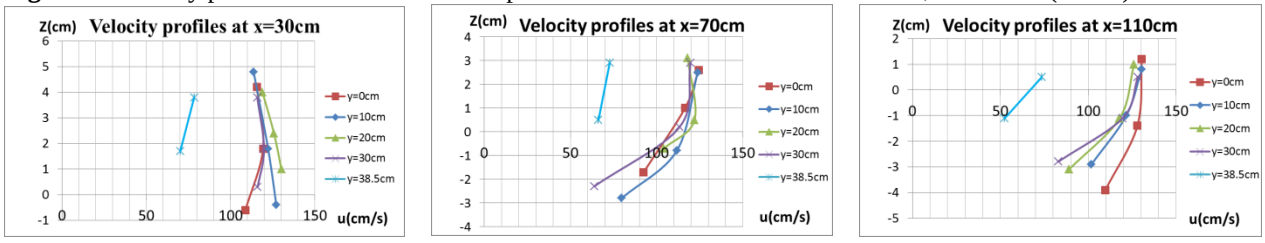


Figure 3. Velocity profiles of stream-wise component at each section for S/dc = 0.800, I = 1/23.3 (Case4)

６．参考文献

[1]建設省河川局監修，改訂新版　建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[Ⅱ]，技法堂出版，1999.
[2]青木一繁，高橋直己，安田陽一，第 69 回年次学術講演会，土木学会，第 2 部門，Ⅱ-168, CD-ROM, 2014.
[3]安田陽一，水生生物の遡上行動からみた魚道からの流れ，日本流体力学会，ながれ 33，2014.
[4]安田陽一，技術者のための魚道ガイドライン–魚道構造と周辺の流れからわかること–，コロナ社，154 pages, 2011.