落差部に設置する粗石斜路における流速場についての実験的検討

Experimental investigation on velocity fields in gravel slope with stone-bridges in drop structure

日本大学理工学部土木工学科　正会員　安田陽一
日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻　学生会員　○平岡大貴

1．はじめに

洪水時に落差構造物を越えた流れ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)]．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)]が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外からの流れ込みによっては迷入する可能性がある[3)]．その対策の 1 つとして全断面魚道が挙げられる．これは落差部に，粗礫斜路または階段状の魚道を設けた場合[4)]である．事例として山梨県の山梨市内を流れる重川に設置された床固工の緩やかな階段状の斜路がある．これは洪水流によって構造物の機能が損なわれていないが，経験的に施工されたものであり，さらなる検討が必要である．水工設計上，洪水流中の構造物の安定性を検討し，普遍性を確立することが重要である．

ここでは，落差部下流側を全面的に帯工設置に伴う粗石斜路を設置した場合を対象とし，流入部の形状として第一帯工直上流側にプールを形成させ，プール長の変化によって粗石斜路上の底面形状，水面形状，流速分布がどのように影響するのか実験的に検討した．

2．実験概要

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**写真 1** に示す落差模型および礫を設置した．実験は**表 1** に示す条件のもとで落差模型と第一帯工の高さを同一とし，掘り込んでプールを設け，その長さを 15cm とした場合(Case1,2)と，プールの長さを 30cm とした場合(Case3,4)で行った．なお，下流水位の設定については，緩傾斜路以降で河床洗掘が起き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，流下方向の長さは 100 cm である．落差部下流側に使用した礫は 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 10～30 mm の礫によって整形した．緩傾斜面の勾配は約 1/20（測定結果 1/22.3，1/21.9）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．

a)上流から下流側を見た状況 b)側面から見た設置状況

写真 1 緩斜面型連続石組み帯工群の設置状況

表 1　実験条件

Case	Q (m^3/s)	S (cm)	dc (cm)	S/dc (-)	I (-)	設置区間
Case1	0.112 m^3/s	7.4	12.6	0.587	1/22.3	320 cm
Case2	0.0540 m^3/s	7.4	7.75	0.955	1/22.3	320 cm
Case3	0.112 m^3/s	7.3	12.6	0.579	1/21.9	320 cm
Case4	0.0540 m^3/s	7.3	7.75	0.942	1/21.9	320 cm

dc：限界水深(= $\sqrt[3]{q^2/g}$)
Q：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

3．落差部下流側の水面形状および底面形状

粗石斜路のプール長の変化に伴う水面形への影響を知るために，洪水時を想定した異なる 2 パターンの流量規模で検討したときの水面形状を**図 1** に示す．なお，図に示す底面形状は通水後に安定した状態を確認した後に計測したものである．

同一の流量規模で比較すると Case 1 の場合，落差模型と第一帯工(x=15cm)の間を掘り込み，プールを設けているが，第一帯工下流側で下向きの流れが生じ，第二帯工付近で上向きの流れが生じている． Case 3 の場合，落差部から下向きの流れが生じ，第一帯工付近から上向きの流れが生じている．また，Case 1 の底面形状の第二，第三帯工間のくぼみが Case 3 より大きいことから，礫が流出していることがわかる．すなわち，プールの長さが小さくなると，第二帯工下流側の底面付近で速い流れが生じるようになる．

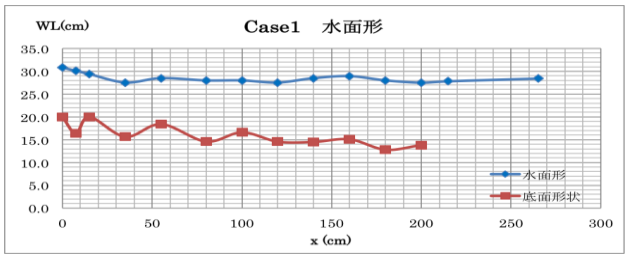
Case 3 の状態より流量規模を小さくすると，Case 4 に示されるように，第一帯工を越える流れが下向きになりやすいため，第一帯工下流側の底面形状の影響を受けて波状水面が形成される．すなわち，Case 4 の状態から流量規模が大きくなると，落差部を通過する流線の曲がりが小さくなり，第一帯工を越える流れが上向きになりやすくなる．

キーワード　魚道，洪水流，減勢工，迷入防止，低落差部
連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8，TEL:03-3259-0409，E-mail: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

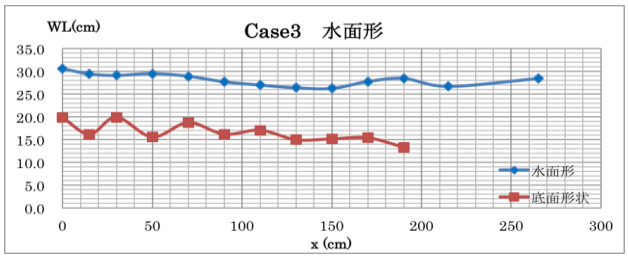
4. 落差部下流側の流速分布

粗石斜路の流入部のプール長の変化に伴う帯工および帯工間の水深方向の流速分布への影響を知るために，Case 1, 3 の流下方向成分の流速分布をそれぞれ図 2，3 に示す．第一，第二帯工間および第二，第三帯工間の流速分布を比較すると Case 3 の主流は Case 1 より上層に位置している．これは Case 3 の場合，第一帯工により上向きの流れが生じたためである．

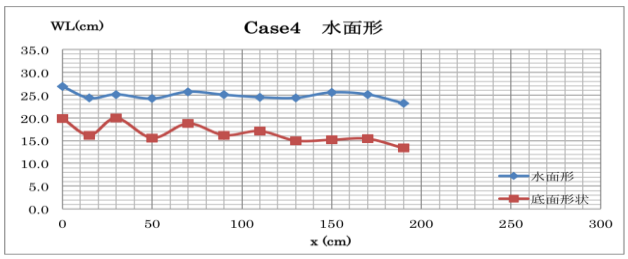
Case 1 と Case 3 との比較から，流入部のプール長の長短によって，第一帯工下流側の主流の位置が異なり，第一帯工下流側の底部の安定性に影響し，帯工の流出可否につながる．すなわち，帯工および帯工間上部の流下方向成分の流速の計測によって，プール長の長短が帯工の安定性，帯工間に堆積された礫の掃流に影響することが推定できた．



1) S/dc=0.587, I = 1/22.3



2) S/dc=0.579, I = 1/21.9



3) S/dc=0.942, I = 1/21.9

図 1 粗石斜路上の水面形状

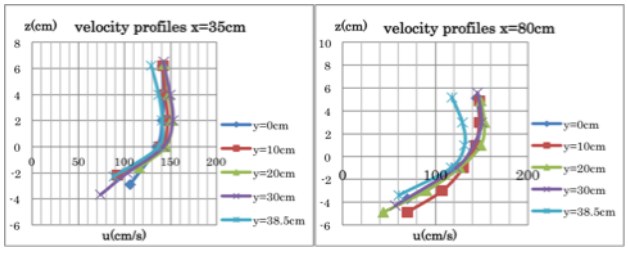


図 2 Case1 の流下方向成分の流速の水深方向変化

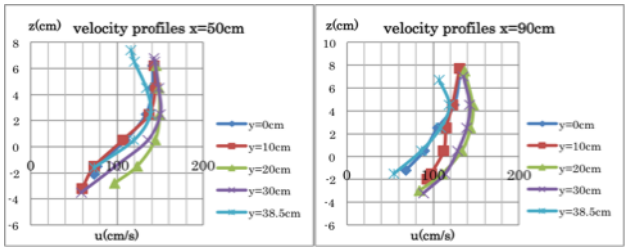


図 3 Case3 の流下方向成分の流速の水深方向変化

写真 2 石組み帯工の設置状態

5. 帯工における石組みの注意点

粗石斜路の洪水時の安定性には帯工の存在が重要であり，帯工の流出の有無には石の組み方が大きく影響する [5]．実験時の帯工の石組みの方法として，帯工の土台を強化するために，帯工の下層には 40～60 mm の礫を用い，帯工は下にある石に被せるように配置する（**写真 2**）．また，石の傾きが上流側の流れに対して 20～45 度の間に収まるように配置する．なお，横断方向にも石同士の接点を持たせ，互いに力が作用するように石組みをする．石組みの仕方が乱雑になると，上記の状態が得られなくなり，容易に流出することが起こり得る．

6. まとめ

落差部下流側を全面的に粗石斜路とし，石組みによる連続帯工によって構成された構造物を対象に，落差部と第一帯工の間に掘り込みのプールを設け，プール長を変化させた場合について，洪水時を想定した流量規模のもとで水面形，流速分布について検討した．同一の流量規模の水面形状と流速分布の比較から，プール長を 30cm とした場合，第一帯工により主流の流線が上方に曲げられるため，第一帯工下流側の底面付近の流速が小さくなることを示した．また，流量規模を小さくした場合でも，プールを設けた場合，主流が上方に位置しやすくなるため，水面の凹凸が小さくなり，帯工の安定性が維持できることを示した．すなわち，粗石斜路の流入部にプールを設け，一定の長さを確保することが洪水対策に重要あることがわかった．

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, pp. 343-348，2014.
4) 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.
5) 安田陽一，宮田逸平，河川環境改善に向けた石組みに関する検討，土木学会関東支部，第 44 回技術研究発表，Ⅱ-31, CD-ROM，2017.