

Step-Pool構造による急流都市河川の 環境に配慮した河道設計法に関する研究

巖島 怜¹・真砂 祐貴²・池松 伸也³・島谷 幸宏⁴

¹正会員 九州大学持続可能な社会のための決断科学センター (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
E-mail: itsukushima@civil.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
E-mail: masago.river@gmail.com

³正会員 九州大学大学院工学研究院環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
E-mail: ikematsu@civil.kyushu-u.ac.jp

⁴フェロー会員 九州大学大学院工学研究院環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
E-mail: shimatani@civil.kyushu-u.ac.jp

急流都市河川に自然再生の事例は少なく、環境に配慮した改修技術は確立されていない。本研究では、長崎市大井手川を対象に、①環境に配慮した親水性の高い河道設計、②エネルギー減勢効果及び河床変動の観点から、Step-Pool構造による最適な落差緩和構造を明らかにすることを目的として、縮尺1/33の移動床水理模型実験を行った。その結果、適切に水制工、護床工を設置し、断面の急縮を避け下流部と接続することで、急流河川においても護岸を用いずに河床の静的平衡を保てること、Step-Pool構造は落差緩和、エネルギー減勢に有効であり、本研究対象区間においてはStep高0.55m、Pool深0.55mのStep-Pool構造を4段配置することで河床変動が抑制され、高いエネルギー減勢効果が得られることが確認された。

Key Words : nature friendly river design, step-pool, urban river, river bank protection

1. はじめに

戦後の都市への人口の集中により、流域の池や湿地などの保水域は埋め立てられ、また、宅地開発等により雨水が浸透する面積は減少した。そのため、降雨は短時間で河川まで到達し、保水域・浸透域の減少により流出量は増大し、その結果、昭和30年代になると、都市型水害といわれる洪水が頻発するようになった。都市型水害に対応するために直立の護岸、コンクリートで覆われたいわゆる三面張りの川が整備された。このような河川形状の変化によって、生態系は劣化し、河川と人との関係は疎遠となっていった。

こうした状況を改善するため、国土交通省は1990年に「『多自然型川づくり』について」通達を発出し、環境に配慮した河道計画について留意事項を示した。また、1997年には河川法が改正され、河川管理の目的に河川環境の整備と保全が追加された。その後、多自然川づくりに関する技術的、学術的知見が収集され、2008年の中小河川の技術基準の制定により、中流域の「多自然川づくり」の概念に基づく河川改修技術は概ね完成している。しかし、渓流域や急流河川では知見が不足しており、環

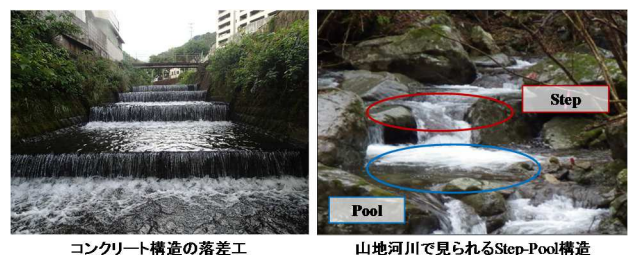


図-1 落差解消の構造 (落差工と Step-pool)

境に配慮した河川改修技術が確立されていない。特に、用地に制限がある都市河川では、限られた空間で治水・環境に配慮した河道を設計する必要がある。

都市部を流下する急流河川では、落差の解消にコンクリート構造の落差工が用いられることが多い(図-1)。しかし、コンクリート構造の落差工は、射流の発生による河床材料の消失、落差による魚類の遡上障害、広範囲に敷設される護床工による水生生物の生息環境の消失など、河川環境に及ぼす影響が大きいことが指摘されている。一方、自然状態での山地河川では、落差のあるStepと平坦なPoolからなるStep-Poolと呼ばれる河床形態が良く観察される(図-1)。これは巨礫や巨石が流路横断方向に

並ぶことで Step 状になり、Step と Step の間が洗掘され、Pool 状を呈しているものである。このような形状が河川縦断方向に連続して形成され、階段状の河床を形成する²⁾。Step-Pool 構造の河道形成における重要な機能の一つは流れの抵抗となることである³⁾。洪水時、流れは Step を乗り越え、緩勾配の Pool 部に落ち込んで、擾乱により洪水流のエネルギーが消散される⁴⁾。イタリア北部の河川では、河岸満杯流量の 36%~57%の状態 で三次元流速を測定した結果、Step-Pool 区間で全エネルギーのおおよそ 2/3 が減勢されていることが明らかにされている⁵⁾。そのため、Step-Pool 構造は河床の過大侵食を防止し、河床を安定させる役割を持つとされる⁶⁾。また、Step-Pool 構造は急流河川の勾配緩和のための落差工としても機能することが期待される。山地河川における Step-Pool を用いた河川自然再生事例は中国⁷⁾や米国⁸⁾でみられるものの、人口が密集する市街地を対象に、河川構造物の安全性や治水上の安全度の観点からエネルギー減勢効果の検討を含めて導入した事例はみられない。

そこで本研究では、落差構造物として Step-Pool を導入した際のエネルギー減勢効果及び河床変動を明らかにし、急流都市河川である長崎市大井手川を対象に、①環境に配慮した親水性の高い河道設計、及び②エネルギー減勢効果及び河床変動の観点から最適な構造の Step-Pool の決定を目的として、移動床水理模型実験を行った。

2. 方法

(1) 対象河川

本研究は長崎市を流下する浦上川水系大井手川（流路延長3.94km、流域面積5.17km²）（図-2）を対象とした。対象区間の平均河床勾配は1/170、両岸に宅地、道路が密集する急流の都市河川である。現況河道は典型的な三面張りコンクリートの河道となっている（図-3）。治水安全度の確保のため、平成26年度より生起確率1/10の流量に対応可能な河川改修工事を長崎市が実施しており、環境に配慮した河道となるよう九州大学が設計に対して助言を行っている。

(2) 環境に配慮した河道設計

対象区間は、密集市街地があり教育施設が多く存在することから、市民の憩いの場となるような親水性の高い水辺空間を創出することを目指し、環境に配慮した河道設計を行った。当初設計河道（図-4(a), (b)）は、コンクリート三面張りの河道であり、①河道内の環境が単調で生物の生息環境が乏しい、②河岸の法勾配が急(1:0.5)であり水際へのアクセスが困難である、③景観が美しくない、④狭小で深い河道であるため洪水時の流速や

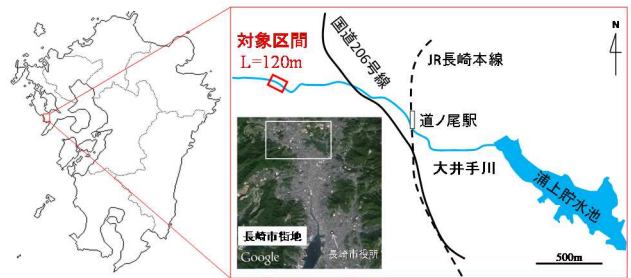


図-2 研究対象地

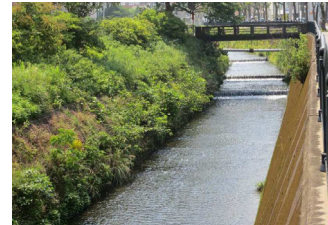


図-3 現況河道の状況 (2k140付近)

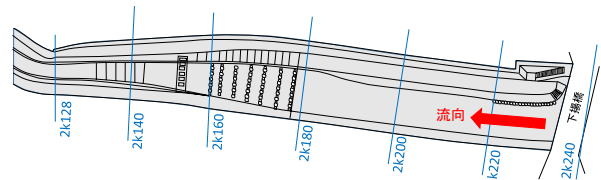


図-4(a) 当初設計河道 (平面図)

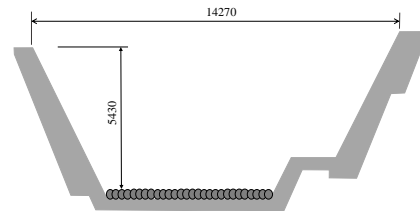


図-4(b) 当初設計河道 (横断面図2k160)

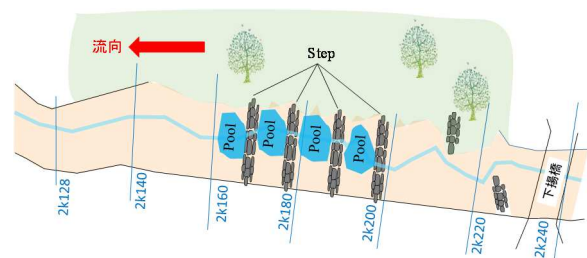


図-5(a) 提案河道 (平面図)

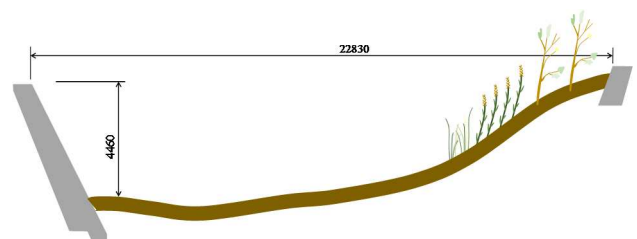


図-5(b) 提案河道 (横断面図2k160)

掃流力が大きく護岸や根固め等の河川構造物に作用する流体力が大きい、という課題がある。そこで、修正案として、①多様な生物の生息環境を創出する、②人が水際まで近づけるようにする、③景観を美しくする、④広くて浅い河道とし洪水時の流速や掃流力を増大させないことを目標とした。具体的には、水際をコンクリートで固めない、従来のコンクリートの落差工ではなくStep-Pool構造により落差を緩和する、河岸に木を植えるという3点に配慮し、概略設計を行った(図-5)。当初河道と提案河道の対象区間における縦断面図を図-6に示す。図-5の河道を実現するためには、①計画対象流量(生起確率1/10)を氾濫が生じず安全に流下できる、②コンクリートによる護岸を用いずに河岸侵食、河床洗掘を防止できる、③Step-Pool構造により落差箇所におけるエネルギーを減勢できることが必要である。そこで、移動床水理模型を構築し実験を行うことで詳細な河道設計を行った。

(3) 模型実験

a) 水理模型の諸元

水理模型実験は縮尺1/33、無歪、フルード相似に従った移動床模型により行った⁹⁾。現況河道がコンクリート三面張りであり、現地の河床材料の粒径が不明であることから、本研究では、2k140の断面の摩擦速度を計算し摩擦速度と代表粒径の関係図¹⁰⁾から、現地の河床材料の代表粒径を70mmと設定した(図-7)。水理模型の再現範囲は浦上貯水池より上流の2k128~2k240の約120m区間とした(図-5(a))。

b) 実験方法

対象流量は、河道のスケールや平面形態を規定する流量⁹⁾である平均年最大流量(生起確率1/2、以下1/2流量と表記)及び改修計画の対象流量である生起確率1/10(以下1/10流量と表記)の流量を対象とした。流量は、当該改修事業の既存の設計成果¹¹⁾から長崎海洋気象台における降雨強度曲線図、流域面積(3.75km²)及び流出係数(0.78)を用い、合理式により算定した。その結果、当該区間における流量は1/2流量で55m³/s、1/10流量で80m³/sとなった。

実験は大きく2つに分けられる。まず始めに、2.(2)で設計した河道に対して改修目標である1/10流量を通水し、河床変動や河岸の侵食など土砂移動が抑制された静的平衡で氾濫しない河道を作成した。流れや河床変動の様子を観察し、水制工の配置や急縮部への護岸の擦り付け角度をtry and errorを繰り返して調整し、安定した河道を設計した。

河床の土砂移動や河岸侵食が収まり、対象洪水を安全に流下させることができることを確認した後に、Step-Pool部の詳細な設計のための実験を行った。Step-Pool構造は2k160~2k200の40m区間で落差2.2mを緩和する構造

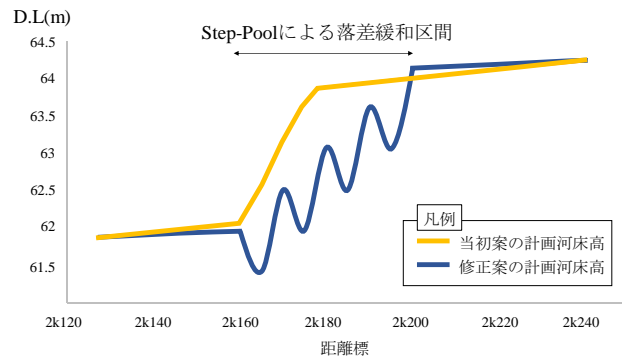


図-6 当初案と修正案の計画河床高

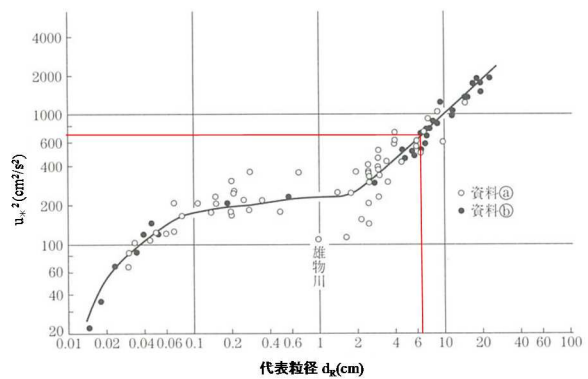


図-7 摩擦速度と代表粒径の関係⁸⁾

表-1 実験case

実験case	Step高 h_s (m)	段数	Pool水深 d (m)
1	1.10	2	1.10
2	1.10	2	2.20
3	0.73	3	0.73
4	0.73	3	1.46
5	0.55	4	0.55
6	0.55	4	1.10
7	0.44	5	0.44
8	0.44	5	0.88
9	0.37	6	0.37
10	0.37	6	0.74

※上記の10ケースについて1/2流量、1/10流量を通水

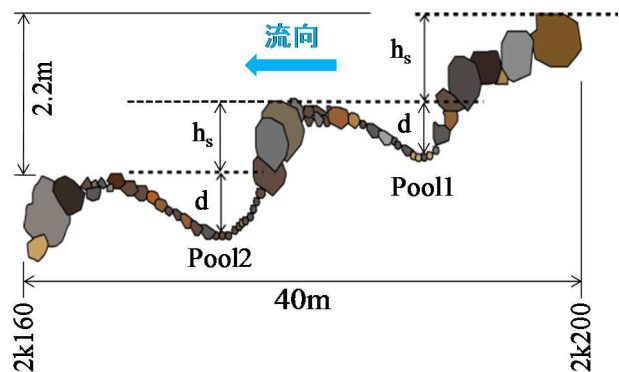


図-8 Step-Poolの縦断構造(2段構造の例)

とし、Step高 (Stepの段数) とPoolの深さ (図-8) を変化させエネルギー減勢の程度及びPoolにおける河床変動量 (堆積, 侵食の程度) を調べた. Step高 (Stepの段数) は5パターン, Poolの深さは2パターン, 流量2パターンの20ケースで実験を行い (表-1), エネルギー減勢及び河床変動の観点から最適なStep-Pool構造を決定した.

c) 計測項目

2k128, 2k140, 2k160, 2k180, 2k200, 2k220, 2k240の7断面で通水時の水位, 流速及び通水前後の地形を計測した. また, 上記断面に加えて, 各Poolの最深部で通水前後の地形を計測した. 河道幅を考慮し, 各横断を3~5点を計測した (図-9). 水位の測定はポイントゲージ, 流速の計測は簡易型プロペラ流速計VR-301/VR3T-2-20N (ケネック製) により行った.

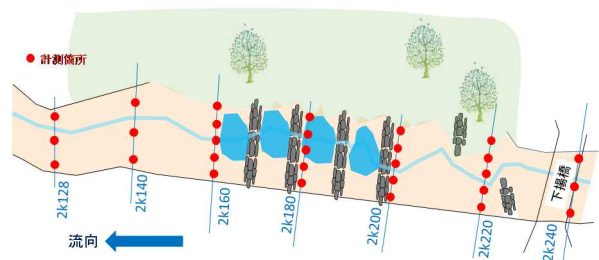


図-9 計測箇所

3. 結果及び考察

(1) 河床変動量の少ない安定した河道の設計

図-4で示した河道に計画対象流量 (生起確率1/10) を通水した結果, ①Step直上流部 (2k160付近) における河床洗掘, ②2k160~2k200区間における河岸侵食, ③2k128付近の急縮部における水位上昇による溢水及び河床洗掘が課題として明らかになった (図-10(a)). それぞれの課題を解決するため, 1/10流量通水時に水制の配置や護岸の摺り付け角度の調整を行い, 河床材料の安定及び溢水が発生しない構造を決定した. その結果, ①洗掘箇所の上流の左右岸に水制工を配置し流速を低減させ河床洗掘を防止する, ②Step構成石を河岸上部まで配置しStepに河岸防御機能をもたせる, ③急縮部に向けて緩やかに護岸を摺り付ける (摺り付け角度27°程度), 急縮部の河床に巨石を配置し護床工とする, ことで課題を解消することができた (図-10(b)).

従来急流河川の河岸防御はコンクリート護岸により施工されることが一般的であったが, 適切な間隔で河岸上部まで巨石を設置することにより, 河岸近傍の流速を低減し侵食を防御可能であることが示唆された. また, 当該河川では, 下流狭窄部の流下能力から改修目標流量が1/10確率となっているが, 本実験においては, 計画目標を超過する洪水に対する河道の安全性について確認するため, 河岸満杯流量 (生起確率1/50程度) を流下させ, Step構成礫が移動しないことを確認している.

(2) 最適なStep-Pool構造の検討

(1)で作成した安定河道を用いて, Step-Pool構造を変化させ実験を行った. ここでは, エネルギー減勢効果と河床変動の程度により最適な構造を決定した. エネルギー減勢効果については, 2k200及び2k160における全水頭から, (1a) のエネルギー減勢率 (1b) を算出しStep-Pool

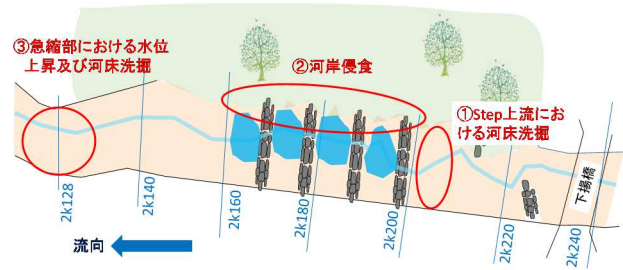
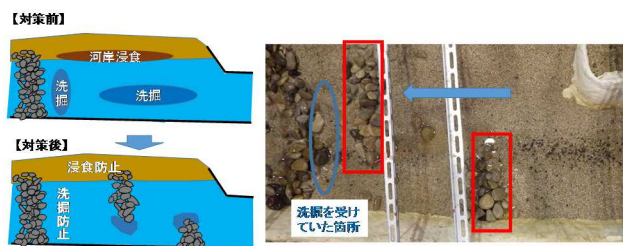
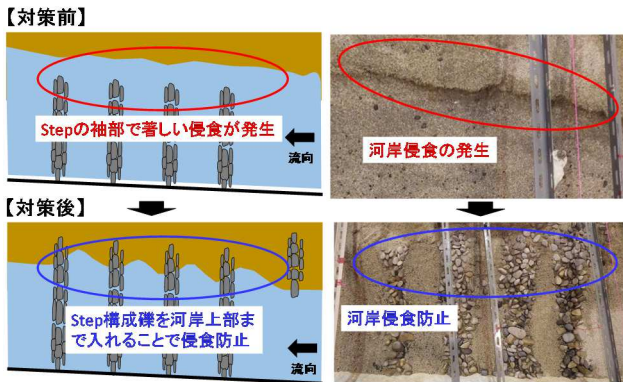


図-10(a) 当初設計河道で発生した課題

①Step上流部における河床洗掘



②Step-Pool構造部における河岸侵食の防止



③急縮部における水位上昇による溢水及び河床洗掘

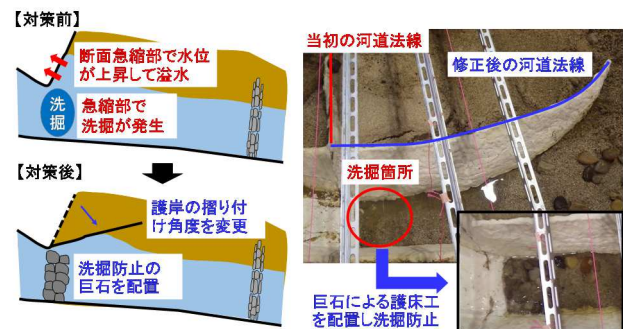


図-10(b) 当初設計河道の課題への対応策

区間における減勢効果を評価した。

$$\text{全水頭 } E = \frac{v^2}{2g} + h \quad (1a)$$

h : 水深(cm), v 流速(cm/s), g : 重力加速度(cm/s²)

$$\text{減勢率 } \Delta E = 1 - \frac{E_{\text{①}}}{E_{\text{②}}} \quad (1b)$$

$E_{\text{①}}$: 2k160 の全水頭, $E_{\text{②}}$: 2k160 の全水頭

各実験ケースの断面毎の全水頭 E の推移を図-11に示す。各ケースともにStep-Pool構造の前後である2k200と2k160の間で大きくエネルギーが減勢がされていることがわかる。次に、各実験ケースのエネルギー減勢率を示したものを図-12に示す。グラフの縦軸に減勢率をとっており、上の方がエネルギー減勢効果が高いことを示している。

1/2流量, 1/10流量ともに上に凸のグラフであり、あるStep高で最も減勢効果が高くなりそれよりstep高が大きい、或いは小さいと減勢効果が減少する傾向が見られた。

減勢率は1/2流量では0.13~0.23, 1/10流量で0.06~0.14であり1/2流量の方が減勢率が高かった。また、Pool深の違いによる減勢効果についてみると、1/2流量の場合は4段のケースを除きPool深が大きいほうが減勢効果が高く、1/10流量では2段のケースを除きPool深が小さいほうが減勢効果が高かった。最も減勢効果があるStep高は流量規模により異なり、1/2流量では4段 ($h_s=0.55m$)、1/10流量では3段 ($h_s=0.73m$) である。

次に各実験ケースの河床変動について説明する。図-13及び図-14は各実験ケースの各Pool断面における最大洗掘深又は最大堆積厚を河床変動量として示したものである。また、各Poolの洗掘深及び堆積厚の絶対値の合計を総河床変動量とした。全体的な傾向として上流側のPoolほど洗掘量が大きく、下流に向かうほどその量は減少し、下流Poolほど堆積量が大きいことがわかる。これは、各Step-Poolでエネルギーが減勢されるため、下流側で土砂運搬能力が下がり、堆積するためと考えられる。また、総河床変動量が最も少ないのは1/2流量, 1/10流量ともStep高が0.55m (4段構造) のケースである。

上記のStep-Pool構造によるエネルギー減勢機構とPoolにおける河床変動量から、当該区間ではStep高が0.55m (4段構造), Pool深が0.55mの構造が最適と考えられる。

(3) Step-Pool構造における跳水現象について

ここでは、Step-Poolを流下する際の流れの機構について考察する。射流の流れが下流の常流流れに遷移する場合、表面渦を伴う跳水が発生する。この遷移については、限界水深やFroude数がパラメータとして用いられているが、限界水深の発生箇所である支配断面の特定は不確実性があること¹²⁾や、自然河

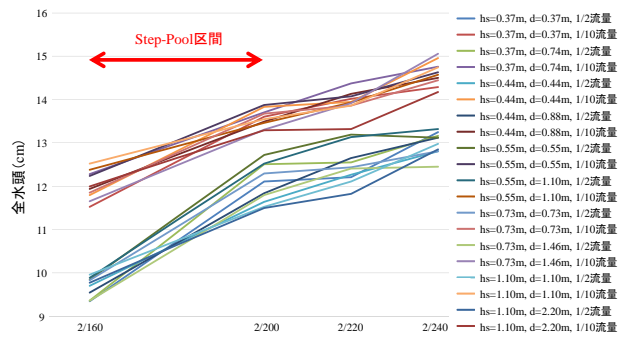


図-11 全水頭の推移

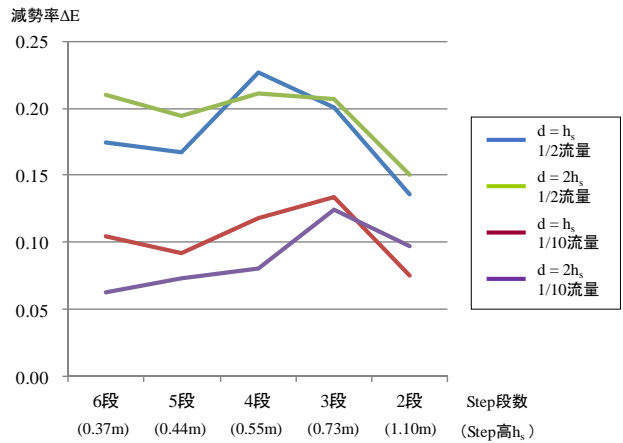


図-12 全水頭の減勢率

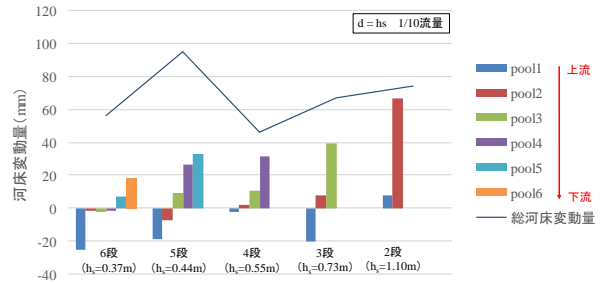


図-13 河床変動量 ($d = h_s$ 1/10流量)

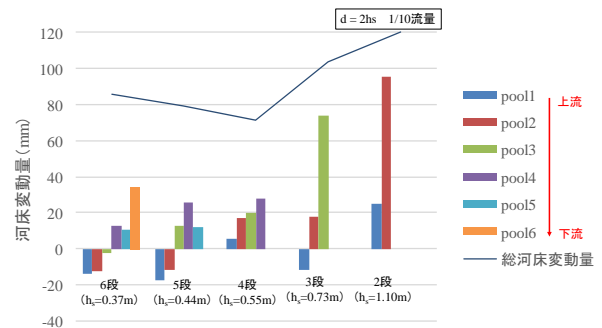


図-14 河床変動量 ($d = 2h_s$ 1/2流量)

川におけるStep近傍での流れは下流の擾乱の影響を受けるため、Froude数は独立した変数ではなく、跳水現象を規定する変数として有効でないことが指摘されている¹³⁾。

一方で、Step上流の全エネルギーを算定することは、実用的で確実である。Step上流における速度水頭と水深の和であるHと、Poolの深さとStep高の和であるPを用いて流量とStep高に関するエネルギーを示す無次元量として(H+P)/Hが導入されている¹⁴⁾。これは、あるエネルギーの状態を達成する幾何学的要件は、Step高或いは、流れの状態のいずれかに依存することを示している¹³⁾。(H+P)/Hが高いことは、Step高が高くStepを流下する流量が低いことを示しており、Step高が0に近づくとき無限大に漸近する¹⁵⁾。Leauthusserらは、この指標と跳水時におけるsubmergenceの程度を表す無次元量 h_d/H との関係から跳水現象を下記の式により分類している¹⁶⁾。また、下記式で表される跳水現象の模式図を図-15に示す。 h_d は、Step-Poolを流下する間に損失した水頭とStep-Pool下部における速度水頭の和である。

Pushed-off jump(Swept-out jump)

$$\frac{h_d}{H} = 1.003 \left(\frac{H+P}{H} \right) - 0.744$$

Hydraulic jump(Optimum jump)

$$\frac{h_d}{H} = 0.838 \left(\frac{H+P}{H} \right) - 0.868$$

Drowned jump(Plunging nappe)

$$\frac{h_d}{H} = 0.176 \left(\frac{H+P}{H} \right)^{1.679}$$

No jump(Surface nappe)

$$\frac{h_d}{H} = 0.16$$

本節では、無次元のパラメータである(H+P)/Hと h_d/H の関係をから、本実験におけるStep-Pool構造での跳水現象について考察を行った。ここでは、HをStep上流断面(2k200)における速度水頭及び水深の和、Pを2k160～2k200におけるPool深(d)とStep高(hs)の和、 h_d を2k200～2k160間の損失水頭と2k160における速度水頭の和とした。図-16は本実験における(H+P)/Hと h_d/H の関係と、参考として既往研究のItalia, Rio Cordonのプロット⁹⁾を示したものである。本実験の結果では各実験ケースともにDrowned jump(潜水跳水)の状態であることがわかる。一方、Italia, Rio CordonではStep高は0.3m程度と大きくないものの、 h_d/H が大きくPushed-off jumpの領域に属している。これは、河床勾配の違いに起因するものと考えられる。Italia, Rio Cordonでは河床勾配が1/30程度であり、全水頭に占める速度水頭の割合が大きいため、本実験結果(平均河床勾配1/170)とは異なり、強い跳水を示していると考えられる。

本実験の結果から、流量規模が同一であれば、 h_d/H はPoolの水深やStepの段数によらず同程度の値であり、流量規模が小さいほどHydraulic jump(完全跳水)に近づく

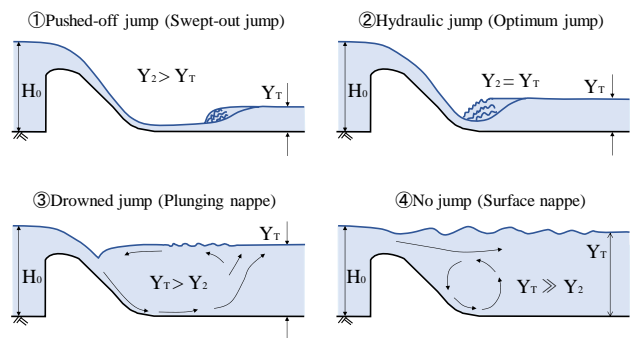


図-15 跳水時におけるsubmergenceの程度 (Tschantz 2011¹⁷⁾を一部改変)

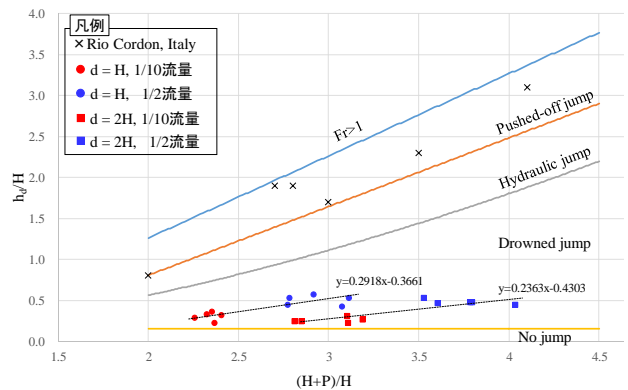


図-16 本実験における(H+P)/Hと h_d/H の関係図

結果となった。また、Pool深が同じ実験ケースを比較すると、(H+P)/Hと h_d/H は比例関係であることがわかる。しかし、直線の傾きはPool深が小さいほうが大きく、Poolの構造によってエネルギー減勢の程度が異なることがわかる。これらのことから、エネルギー減勢に最適なStep-Pool構造は河床勾配、Step高、Pool深によって異なることから、導入に際しては現地の状況に適した構造を検討することが重要である。

4. 結論

本研究は、Step-Pool構造を用いた急流都市河川における環境に配慮した河道設計を目的に行ったものである。得られた知見については、下記のとおりである。

- ①急流河川においても水制工を適切な間隔で河岸上部まで配置することで、コンクリート構造の護岸に代わり河岸の浸食を防ぐことが可能であることがわかった。
- ②大井手川においては、エネルギー減勢効果と河床変動の観点からStep高及びPool深が0.55mのStep-Poolが最も適切な構造であることが明らかとなった。
- ③Step-Poolにおけるエネルギー減勢効果は、河床勾配やStep-Poolの構造によって異なるため、Step-Pool構造による落差緩和の技術体系化のためには更なる詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり長崎市土木維持課の皆さまに多大なご協力をいただきました。ここに、改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 数馬田貢, 林田寿文: ステップ・プール構造の落差工設計と現場への適用についてー良好な河川環境の回復と河床低下対策への可能性ー, 第56回北海道開発技術研究発表会, 2012.
- 2) 権田豊, 岡崎達也, 西井洋平, 川邊洋: 山地河川における Step-pool 構造の形状及び分布特性, 新潟大学農学部研究報告 61(1), pp.67-93, 2008.
- 3) Chin, A. and Wohl, E.: Toward a theory for step pools in stream channels, *Progress in Physical Geography*, Vol.29, Issue.3, pp.275-296, 2005.
- 4) Abrahams, A. D., Gang, L. and Atkinson, J. F.: Step-pool: adjustment to maximum flow resistance, *Water Resource Research*, Vol.31, Issue.10, pp.2593-2602, 1995.
- 5) Wilcox, A. C., Wohl, E. E., Comiti, F. and Mao, L.: Hydraulics, morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel, *Water Resource Research*, Vol.47, Issue.7, Article number W07514, 2011.
- 6) Wilcox, A. C., Nelson, J. M. and Wohl, E. E.: Flow resistance dynamics in step-pool channels: 2. Partitioning between grain, spill, and woody debris resistance, *Water Resource Research*, Vol.42, Issue.5, Article number W05419, 2006.
- 7) Yu, G. A., Wang, Z. Y., Zhang, K., Duan, X. and Chang, T. C.: Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.48(2), pp.178-187, 2010.
- 8) Roni, P., Bennett, T., Morley, S., Pess, G. R., Hanson, K., Van Slyke, D. and Olmstead, P.: Rehabilitation of bedrock stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota, *River Research and Applications*, Vol.22, Issue.9, pp.967-980, 2006.
- 9) 須賀堯三: 水理模型実験, 山海堂, 1990.
- 10) 山本晃一: 沖積河川ー構造と動態ー, 技報堂出版, 2010.
- 11) 長崎市: 都市基盤河川大井手川設計業務委託報告書, 2002.
- 12) Ackers, P., White, W. R., Perkins, J. A. and Harrison, A. J. M.: Weirs and flumes for flow measurement, *John Wiley and Sons, Chichester*, pp.327, 1978.
- 13) Wyrick, J. R. and Pasternack, G. B.: Modeling energy dissipation and hydraulic jump regime responses to channel nonuniformity at river steps, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol.113, Issue.3, Article number F03003, 2008.
- 14) United States Bureau of Reclamation.: Studies of crests for overfall dams. Boulder Canyon Project final reports: Part VI. *Hydraulic investigations. Bulletin*, Vol.3, 1948.
- 15) Pasternack, G. B., Ellis, C. R., Leier, K. A., Valle, B. L. and Marr, J.D.: Convergent Hydraulics at horseshoe steps in bedrock rivers, *Geomorphology*, Vol.82, Issue.1-2, pp.126-145, 2006.
- 16) Leauthusser, H. J. and Brik, W. M.: Drownproofing of low overflow structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.117, Issue.2, pp.205-213, 1991.
- 17) Tschantz, B. A. and Wright, K. R.: Hidden Dangers and Public Safety at Low-head Dams, *the journal of dam safety*, Vol.9, Issue.1, pp.8-17, 2011.

(2015. 7. 27 受付)

A STUDY ON NATURE FRIENDLY RIVER CHANNEL DESIGN METHOD USING STEP-POOL STRUCTURE FOR STEEP URBAN RIVER

Rei ITSUKUSHIMA, Yuki MASAGO, Shinya IKEMATSU
and Yukihiro SHIMATANI

Nature friendly river improvement technology of upper reach is not established. We conducted physical, movable-bed model to design nature friendly river channel of the Oide River and investigate energy dissipating effect of step-pool structure.

As a result, river bed fluctuation and bank erosion could be minimized without using concrete river bank protection by appropriate arranging of groin and riprap. And, the experiment revealed that the step height and pool depth of 0.55m is the most appropriate structure of step - pool with the point of energy dissipation and river bed fluctuation in the Oide river.