

水理模型実験による伝統的空石積み護床工の減勢機能の定量的評価

兒玉, 健佑
株式会社建設技術研究所大阪本社環境部

林, 博徳
九州大学大学院工学研究院

池松, 伸也
九州大学工学部技術部

島谷, 幸宏
熊本県立大学

<https://hdl.handle.net/2324/7174514>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering). 78
(2), pp.I_313-I_318, 2022. 土木学会
バージョン :
権利関係 : © 2022 Japan Society of Civil Engineers



水理模型実験による伝統的空石積み護床工の減勢機能の定量的評価

兒玉 健佑¹・林 博徳²・池松 伸也³・島谷 幸宏⁴

¹ 非会員 株式会社建設技術研究所大阪本社環境部 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町 1-6-7)
E-mail:kodamaken.river@gmail.com (Corresponding Author)

² 正会員 九州大学大学院工学研究院准教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

³ 正会員 九州大学工学部技術部 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁴ フェロー会員 熊本県立大学特別教授 (〒862-8502 熊本市東区月出 3 丁目 1 番 100 号)

伝統工法の一つである空石積み護床工は、その自然環境との親和性の高さから Nature-based Solutions としての価値が見直されつつある。しかし、その治水機能については定量化されていないため、治水構造物としての価値づけが適切になされていない。本研究では、空石積み護床工の有する治水機能を水理模型実験により定量的に明らかにすることを試みた。模型縮尺は 1/30 とし、現地の測量結果およびフルードの相似則に従い実験条件を設定した。水理模型は対象とした空石積み護床工と、一般的なコンクリート構造の護床工についても作成し、同様の条件で実験を行い、比較検討を行った。その結果、空石積み護床工は優れた流速減勢機能を有することが明らかとなった。最大流速を野面空石積み護岸の設計流速以下に抑えられることも明らかとなり、河道内構造物の安全性を高めることが示唆された。

Key Words: *hydraulic experiment, dry masonry bed sill, Nature-based Solutions, energy dissipation, traditional structure*

1. はじめに

気候変動、生物多様性の減少といった環境問題を背景に、「Nature-based Solutions」に基づいた行動が求められつつある¹⁾。NbS は自然に触発された、あるいは自然によってサポートされた社会問題解決法である²⁾。気候変動や開発により、世界各地で洪水の被害は大きくなりつつあり、従来の治水策では対応できなくなっている³⁾。NbS を適用する治水では、森林、湿地、氾濫原等の Natural Infrastructure を利用する。NbS に基づき維持管理された河川は洪水を減らしつつ、魚の資源を維持、促進し、観光やレクリエーションの利益を提供するとの報告もある⁴⁾。さらに近年、Natural Flood Management として、下流のピーク流量を抑えるために河床の粗度を上げて流れを遅くすることが推進されている⁴⁾。永井らは河道の粗度を上昇させると下流の水位が下がることを示した⁵⁾。また、河川の安全性の点では水位の減少だけでなく洪水時の流速を低減することが重要である。洪水時の流速低減には Instream Structure 技術を用いることが効果的である⁶⁾。例えば、Robert C. Grabowski らは河道内の倒木が洪水流の勢いを和らげ下流の災害を減らすと述べている⁷⁾。このように河道管理においても治水と環境の統合は世界的な潮

流であり、NbS の重要性は今後ますます高まると推測される。本研究では instream structure の中でも護床工に着目する。本研究で言及する護床工とは堰や落差工等の下流に設置され、川底を護り、洗堀を防止する構造物の事を言う。冒頭で述べた通り、NbS の重要性が高まりつつある中、護床工についても自然環境と調和した工法が求められている。一般的に護床工として導入されることの多いコンクリート構造の護床工は、高い流速や落差によりほとんどの水棲生物に適しない⁸⁾。一方自然石積みを活用した護床工は自然環境との親和性が高く、例えば Rock Ramps は優れた流速減勢や、魚類の遡上を助ける、隠れ場や休息場を提供する機能があるなどの報告もある⁹⁾。さらに流域内の素材が用いられることで経済的かつ河川本来の環境を損なわない等の利点をもつとされている¹⁰⁾。日本には伝統的な石積みで作られた護床工が存在する¹¹⁾。日本では、主として戦国時代～江戸時代 (1500～1600 年代) に築城技術と相まって石積みの技術が発展し、数多くの石積みの構造物がつくられた。現在でもなおその機能を発揮する構造物も多く、歴史的伝統的にも価値が高いと推測される¹²⁾。しかし、これらの多くは経年劣化や昨今の災害外力の増大に伴い、被災によって失われることも多い¹²⁾。このような状況は、河川環境劣化や歴史的な価値

の喪失という観点からも避けなければならない。そして、何より治水機能を十分に発揮しつつ、環境機能や歴史的な価値も継承できる対策が求められている¹³⁾。

本研究では、伝統的的空石積み護床工が多く現存する野鳥川の空石積み護床工に着目した。この護床工は、流れを減勢する機能や河床維持などの治水機能を有するのみならず、歴史的な価値や多くの生物を目視で確認できるなど優れた環境機能を有している。すなわち、優れたNbSの一つであると推測される。

一般的な護床工や落差工などの縦断構造物の減勢機能については多くの既往研究^{例えば 14)15)16)17)}がありその有効性や課題が整理されている。一方で、伝統的な空石積み護床工をNbSとして捉え、その減勢機能について定量的に評価された知見は乏しく、価値が正しく評価されていない。そのため、本研究対象地の伝統的護床工も復旧事業によりコンクリート等でつくられた代替構造物に置き換えられる傾向にある。したがって石畳護床工をNbSとしてとらえ、その機能について科学的に検証することが求められている。そこで本研究では、伝統的な石畳護床工の減勢機能について定量的に評価することを目的とする。本研究では野鳥川の護床工(図-1)に着目し、その構造や形状を水理模型によって再現し、伝統的護床工の有する減勢機能を定量的に明らかにすることを試みた。

2. 野鳥川に残る空石積み護床工の特徴

現地調査により、野鳥川の空石積み護床工の縦断構造、使用されている石材の大きさ、石材の積み方などについて詳細に把握した。調査によって明らかになった空石積み護床工の縦断図を図-2に、その構造のスケッチ図を図-3に示す。なおいずれも、流心部分での測量結果である。高さは約1.8mで縦断延長は約15mであった。縦断勾配については平均で1/8であった。空石積み護床工の石材の積み方については石の面が水平となるように階段状に積み上げられていること、概ね1m内外の粒径の石材が用いられていること、縦断勾配の変化点には1m以上(1.0~2.5m程度)の巨石が用いられていること等が明らかとなった。石材の材質としてはこの地域の流域地質でもある花崗岩が用いられていた。なお、本実験では、現地調査で得られた空石積み護床工の構造や石材の積み方の特徴(図-3参照)を、実際の石積み施工経験者の指導を受けつつ模型上でも精巧に再現した。

3. 水理模型実験方法

野鳥川に残る空石積み護床工の洪水時における流れを1次元流水理模型実験により再現し、その減勢効果およびその粗度の大きさを定量的に評価した。

(1) 水理模型についての諸元

水理模型実験実施に際し、以下に示す3タイプの模型を用意した。模型は全て1/30スケールとした。
伝統工法型：伝統的的空石積みによる護床工
落差型：落差を伴うコンクリート護床工
斜路型：コンクリート製斜路型護床工
伝統工法型は先述の現地調査結果を参考に空石積み護床工の構造や石材の積み方の特徴を精工に再現し、1/30スケールで作成した。落差型は垂直落差を伴ってその直下から下流まで設置されるコンクリート護床工を想定している。斜路型は落差を伴わないようにスロープ状の護床工を想定している。伝統工法型の作成において、現地と同じく花崗岩を用いて、その石の大きさも1/30となるように選んだ(図-4および図-5参照)。ただし、裏込め材には玉砂利を用いた。堰の高さは現地の1/30で6cmとした。縦断延長も現地の1/30で48cmとした。石の積み方も現地と同じとなるように石の面を水平にし、階段状に構築した(図-4および図-5参照)。斜路型と落差型についても伝統工法型と同じ落差・延長で作成した。落差は6cmの落差となり、現地スケールでは1.8mの垂直落差を再現となる。その直下から形成されるコンクリート護床工の水叩き部の縦断延長は伝統工法型と同様とした(図-6参照)。斜路型は板を斜めに敷くことにより再現した。その縦断勾配は伝統工法型と同様である(図-7参照)。



図-1 野鳥川に残る伝統的的空石積み護床工

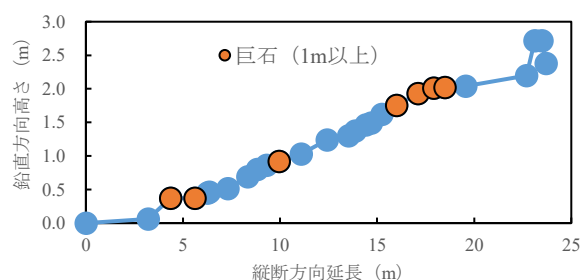


図-2 現地測量に基づく野鳥川の護床工の縦断図
(オレンジ色の測点は1m以上の巨石が用いられていた点)

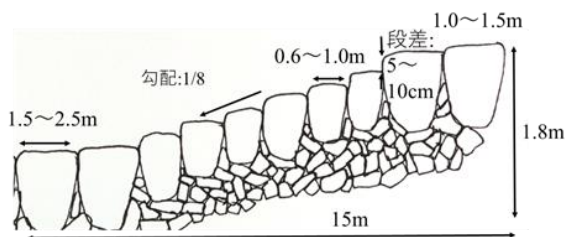


図-3 野鳥川護床工の石の積み方と物理的構造のスケッチ



図-4 現地の積み方を参考に再現した護床工模型

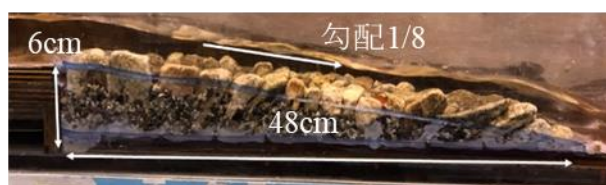


図-5 空石積み伝統工法型の護床工の模型（縦断構造）

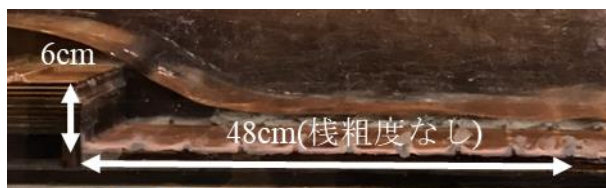


図-6 落差型コンクリート護床工の模型（縦断構造）



図-7 斜路型コンクリート護床工模型（縦断構造）

表-1 平成 29 年 7 月豪雨後の対象護床工における洪水痕跡調査結果

水深 (m)	幅 (m)	流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)
1.00	15.9	3.13	49.77

表-2 フルード相似則より求めた実験水路の単位幅流量

	現地	水路
スケール	1	1/30
単位幅流量	6.67 m ³ /s/m	0.41L/s/cm

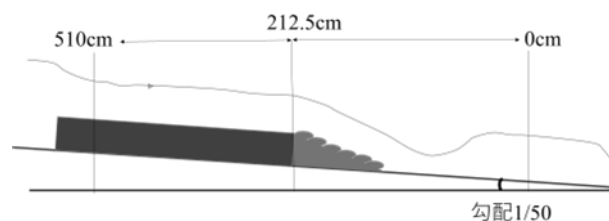


図-8 実験水路模式図

(2) 実験流量の設定

流量は超過洪水時を想定し設定することとした。その設定に際し、2017 年 7 月九州北部豪雨時の対象護床工地点の流量を、洪水痕跡調査結果から算出した。その結果を表-1 に示す。なお、当該箇所は堰（護床工）越流に際し常流から射流に変化する地点であり、当該地の流れを限界流と仮定し、流速及び流量を求めた。また、実験は 1 次元を想定しているため単位幅流量で相似則を満たす必要がある。したがって得られた流量と現地の河川幅から単位幅流量を求め、フルード相似則より実験水路における単位幅流量を算出した。その値を表-2 に示す。

(3) 実験水路

実験は図-8 に示すような計測区間 510cm、幅 15cm の固定床直線水路を用いて行った。その勾配は現地の河川の平均勾配と同様の 1/50 とし、護床工は 1/8 とした。相似性を保つため実験水路床を栈粗度により粗度付けした。栈粗度はその高さの 10 倍の間隔で並べると抵抗が最大となる¹⁵⁾。そのため、栈粗度には 5mm 角の板を用いて、5cm 置きに配置した。粗度付けにより水路に現地スケールで 0.04~0.05 という山地河川相当の粗度を再現することができた。

(4) 実験方法

設定した流量下における水深をポイントゲージにより測定していった。計測点は水路の最下流端より 10cm ごとに設定した。ただし、堰より上流における計測点は 40cm ごととした。水深の計測は、流心部上の 1 点で行い、水面が波立っている箇所ではその波が最も低くなる位置で計測することとした。実験は 3 タイプの模型により 3 ケース実施された。

(5) 実験結果の算出方法

実験データとして得られた流量・水深から種々の値を算出した。ここで、レイノルズ数に関しては、予備実験より実験スケールで 20000~30000、現地スケールではその約 150 倍の値をとり、流れは乱流であることを確認した。さらに、Hopf(1923)¹⁸⁾、山岡(1961)¹⁹⁾の研究によると本研究で対象としている護床工およびその模型は「粗性型」に該当し、レイノルズ数は摩擦損失に影響しないと考えられるため、考察の対象から外すこととした。なお、本実験は流れを 1 次元と仮定しているため、水路内の流速は断面平均流速で評価する。断面平均流速は、以下の式で求めた。

$$U = \frac{Q}{Bh}$$

U : 断面平均流速 (m/s)

Q : 実験流量 (m³/s)

h : 水深 (m)

B : 水路幅 (m)

全水頭は以下の式で算出した.

$$H_t = z + h + \frac{U^2}{2g}$$

H_t : 全水頭 (m)

z : 実験水位 (m)

g : 重力加速度 (m/s²)

第一項は位置水頭, 第二項は圧力水頭, 第三項は速度水頭である.

水路内のマンニングの粗度係数は, マンニング式を変形した以下の式より計測点ごとに逆算した.

$$n = \frac{1}{U} * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}}$$

n : マンニングの粗度係数 (m^{-1/3}/s)

R : 径深 (m)

I : エネルギー勾配 (-)

なお, 任意の計測点 x におけるエネルギー勾配 I は

$$I = \left[\frac{H_t^+ - H_t}{x^+ - x} + \frac{H_t - H_t^-}{x - x^-} \right] / 2$$

として算出した. 上付きの+, -は任意の計測点の1つ上流側の計測点および1つ下流側の計測点の値であることを示している.

各計測点におけるフルード数を以下の定義式により算出した.

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

F_r : フルード数 (-)

4. 実験結果と考察

(1) 水頭分布

図-9～図-11に各ケースにおける水頭の計測結果を示す. 170cm から 212.5cm までが護床工上の計測点である. 各ケースを比較すると, 上流端・下流端における水頭分布に違いがないことが分かる. 一方で全水頭の遷移に着目すると, 伝統工法型では護床工上で滑らかに減少しており, 落差型では 170cm 地点で急激に減少している. 同様に斜路型も 160cm 地点で急激に減少している. このことから, 損失水頭は同じであるが, 伝統工法型は主に摩擦損失により減勢させており, 落差型や斜路型は主に跳水によって減勢させているという違いが考えられる. また, 護床工上およびその近傍において落差型と斜路型では同様に速度水頭が大きく増加している一方で, 伝統工法型では速度水頭の増加が比較的抑えられている

ことが分かる. また, 各ケース個別に着目すると, 図-9において, 伝統工法型では護床工上で全水頭が減勢していることが分かる. 図-10において落差型でも同様に護床工上で全水頭が減勢している. また, 200cm・210cm・212.5cmの計測点において全水頭が不自然な増減を生じる結果となった. これは, 不自然な値を示した計測点が落差により急変流が生じていた区間であり, 計測方法が不適合であったためと考えられる. 以降に示す図ではこの計測点におけるデータは外れ値とみなし, 省略している. 図-11をみると, 斜路型では護床工上で速度水頭が徐々に増加していき, 全水頭はほぼ減勢していない結果となった. したがって斜路型では護床工上でエネルギー減勢はほぼ生じず, 下流の跳水によって減勢は生じていると考えられる.

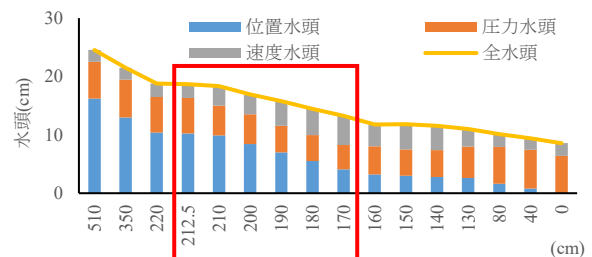


図-9 伝統工法型における水頭の変化 (図中赤枠で囲んだ範囲, 170cm から 212.5cm までが護床工上の計測点)

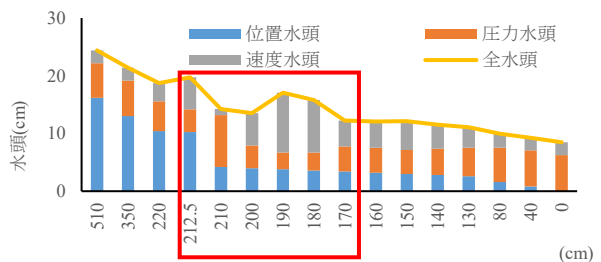


図-10 落差型における水頭の変化 (図中赤枠で囲んだ範囲, 170cm から 212.5cm までが護床工上の計測点)

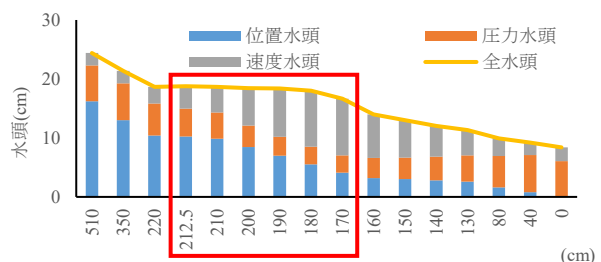


図-11 斜路型における水頭の変化 (図中赤枠で囲んだ範囲, 170cm から 212.5cm までが護床工上の計測点)

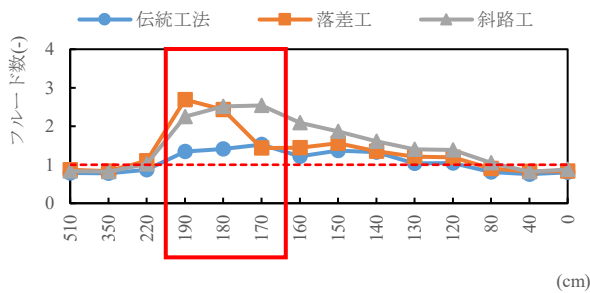


図-12 フルード数の分布(図中赤枠で囲んだ範囲170cmから212.5cmまでが護床工上計測点。図中の赤点線は $Fr=1$ を表す)

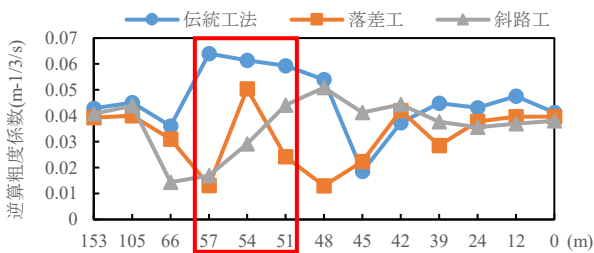


図-13 現地スケールで計測点ごとに逆算したマンニングの粗度係数の分布(図中赤枠51mから57mまでが護床工上における値を示す)

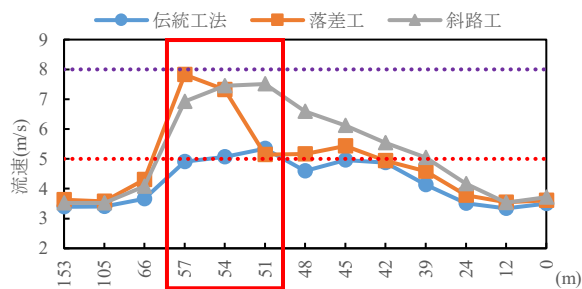


図-14 現地スケールにおける流速分布
(51m から 57m までが護床工上における値を示す。図中の赤点線は空石積み護岸の設計流速 (5.0m/s)、紫点線はコンクリート護岸の設計流速 (8.0m/s))

(2) フルード数分布

フルード数の分布を図-12 に示す。170cm から212.5cm までが護床工上の値である。グラフを見ると伝統工法型が最も射流となる区間が短いことが分かる。逆に最も長くなるのは斜路型である。各ケースにおける射流区間を現地スケールに換算すると、伝統工法型は約 21m、落差型は約 33m、斜路型は約 40m となる。射流は吸出しや洗堀を促進し、構造物を損壊させる¹⁶⁾。そのため、射流区間が短くなることで構造物の安全性が高まると言える。

(3) 現地スケールでの逆算粗度係数分布

図-13 に縮尺を現地スケールに置き換えた数値での、計測点ごとに逆算したマンニングの粗度係数を示す。51m から 57m までが護床工上における値を示す。上流端・下流端の粗度係数に各ケース違いはなくおおよそ 0.04 であった。一方で、護床工部分での粗度

係数にはケース間で顕著な違いが見られた。コンクリート落差工および斜路工では 0.01~0.05 程度で推移しているのに対し、伝統工法型は約 0.06 と非常に高い粗度を示した。これは山地河川の一般的な粗度係数値よりも高く、石畳護床工の流速減勢機能大きいことを表している。

(4) 現地スケールにおける流速分布

図-14 に現地スケールにおける流速分布を示す。図-14 では各ケースに加え国土交通省によって規定されているコンクリートブロック護岸の設計流速 8m/s と野面空石積み護岸の設計流速 5m/s とも比較している²⁰⁾。図-13 と同様、51m から 57m までが護床工上における値を示す。図-14 をみると落差型と斜路型は護床工上で流速が空石積み護床の設計流速を大きく上回り、コンクリート護岸の設計流速程度まで増加する結果となった。一方で伝統工法型では、空石積み護床工の設計流速辺りまでで流速の増加が抑えられる結果となった。このことから伝統的空石積み護床工は流速を抑えることで、空石積みで整備された他の河道内構造物の損壊を防ぐ効果もあることが考えられる。

(5) 伝統工法が減勢効果を発揮する要因

伝統的空石積み護床工が減勢機能を発揮する要因について考察する。本研究で対象とした伝統的護床工は階段状の構造を有し、水理模型でもその特徴が反映された。高橋らは skimming-flow における階段状水路のエネルギー減勢効果は跳水を含めた全エネルギー損失の 7~8 割を占めることを明らかにしており、階段構造の減勢効果の有効性を示した¹⁷⁾。本研究で得られた結果でも、伝統的空石積み護床工は落差工や斜路工と違い、構造物上で連続的にエネルギーを減勢させていた。したがって、伝統的空石積み護床工の減勢効果は階段構造によるものが大きいと考えられる。また、人工的な階段状水路と違い石積みはその段差 1 つ 1 つが様々ではない。この不規則な構造も粗度を上昇させている要因の 1 つとして考えられる。

5. 結論

本研究により、伝統的空石積み護床工は、減勢工として優れた機能を有するということが定量的に明らかとなった。以下に本研究で得られた結論を示す。

1. 伝統的空石積み護床工は一般的なコンクリート護床工よりも速度水頭を増大させることなく全水頭を減勢させる。
2. 伝統的空石積み護床工はその減勢機能により一般的なコンクリート護床工よりも射流区間を短くする。
3. 伝統的空石積み護床工の超過洪水時 (H29 年九州北部豪雨相当の流量時) の粗度係数は、0.06 程

度であり,コンクリートによる護床工に比べ顕著に高い値を有する。

4. 伝統的空石積み護床工は洪水時流速を低減する機能を有しており,超過洪水時であっても最大流速を空石積み護岸の設計流速 5m/s 程度以下に抑えている。

謝辞：本研究は, 科研費 17K12842, 世界自然保護基金(2020-21), 国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野(河川生態) 筑後川研究の助成を受けたものです。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, S. Maginnis.: Nature-based Solutions to address global societal challenges, Gland, Switzerland: IUCN, 2016.
- 2) European Commission.: European Commission Policy Topics: Nature-Based Solutions [website], <https://bit.ly/3px6Spm>, 2021 年 1 月 28 日アクセス.
- 3) Zbigniew W. Kundzewicz, Shinjiro Kanae, Sonia I. Seneviratne, John Handmer, Neville Nicholls, Pascal Peduzzi, Reinhard Mechler, Laurens M. Bouwer, Nigel Arnell, Katharine Mach, Robert Muir-Wood, G. Robert Brakenridge, Wolfgang Kron, Gerardo Benito, Yasushi Honda, Kiyoshi Takahashi & Boris Sherstyukov.: Flood risk and climate change: global and regional perspectives, *Hydrological Sciences Journal*, 59 (1), pp1-28, 2014.
- 4) Stuart N. Lane.: Natural Flood Management, *WIREs Water*, 4(3), 2017.
- 5) 永井遥, 久保純子: 英国の事例をふまえた日本の都市河川における Natural Flood Management の有効性の検討, *日本地理学会発表要旨集*, p127, 2020.
- 6) Scottish Environmental Protection Agency.: Natural Flood Management Handbook, 2011.
- 7) Robert C. Grabowski, Angela M. Gurnell, Lydia Burgess-Gamble, Judy England, David Holland MCIWEM, C.WEM, Megan J. Klaar, Ian Morrissey, Chris Uttley, Geraldene Wharton.: The current state of the use of large wood in river restoration and management, *Water and Environment Journal*, 33, pp366-377, 2019.
- 8) Marq Redeker.: FISH DON'T LIKE TO LEAP OR CRAWL – AN UPDATE ON ENSURING AND RESTORING UPSTREAM FISH PASSAGE, *Water New Zealand, Stormwater Conference 2010*, 2010.
- 9) Abul Basar. M. Baki., David Z. Zhu., Nallamuthu Rajaratnam.: Mean Flow Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (2), 2014.
- 10) John E. Brittain.: Weirs as a Mitigation Measure in Regulated Rivers-The Norwegian Experience, *Canadian Water Resources Journal*, 28 (2), pp217-229, 2003.
- 11) リバーフロント研究所: 伝統的河川工法に関する研究, 平成 2 年度研究所報告, 1991.
- 12) 長尾朋子, 平成 16 年福井豪雨災害からの復興と足羽川における伝統的治水工法の衰退, *日本地理学会発表要旨集*, 2007.
- 13) 環境省, ハンドブック: 自然と人がよりそって災害に対応するという考え方, 2016
- 14) 安田陽一, 増井啓登: 低落差部に設置する大粗度斜路式減勢工の提案, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 75(2), I_559- I_564, 2019
- 15) 足立昭平: 開水路における棧型人工粗度の実験的研究, *京都大学防災研究所年報*, 3, 17-33, 1959.
- 16) 俣熊公子, 前野詩朗, 吉田圭介, 高田大資, 山村明: 射流場の護岸・根固めブロックに作用する流体力評価, *水工学論文集*, 69(4), pp I 691- I 696, 2013.
- 17) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫, 階段状水路における Skimming flow のエネルギー減勢, *水工学論文集*, 45, pp415-420, 2001
- 18) Prandtl, Tjetjens: Hydro and Aero-Dynamics, 新羅一郎・糸川英夫・松川昌蔵(邦訳): プラントル, ティーチェンス航空流体力学, 理工学出版社, 1940
- 19) 山岡勲: 河床の粗度について, *北海道開発局土木試験所月報*, 100, 1961
- 20) 国土交通省 水管理・国土保全局 防災課: 美しい山河を守る災害復旧基本方針, p64, 2018

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

QUANTITATIVE EVALUATION OF ENERGY DISSIPATION FUNCTION OF TRADITIONAL DRY MASONRY BED SILL BY HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS

Kensuke KODAMA, Hironori HAYASHI, Shinya IKEMATSU
and Yukihiro SHIMATANI

The purpose of this study is to quantitatively evaluate the energy dissipation function of a traditional dry masonry bed sill on the Notori River in the Akizuki district of Asakura City, Fukuoka Prefecture, using hydraulic model experiments. The experimental scale was set to 1/30 according to Froude's law of similarity. The experimental discharge was set based on the flow observation results at the time of the heavy rainfall in July 2017. 3 types of hydraulic models were prepared: a traditional bed sill model and 2 general concrete bed sill models. The experimental results showed that the traditional bed sill of the Notori River has a high-velocity reduction function, and its roughness coefficient value was determined to be 0.06. The results also suggest that the bed sill can enhance the safety of the in-channel structure because the flow velocity can be kept below the design flow velocity of the dry masonry revetment.