河川技術論文集, 第22巻, 2016年6月

足羽川水面利用施設の土砂堆積軽減に関する研究

A STUDY ON REDUCTION OF SEDIMENTATION AT THE WATER SURFACES UTILIZATION FACILITY IN ASUWA RIVER

田安正茂[1]・流　守博[2]・田中謙次[3]・田邊祐真[4]・廣部英一[5]
Masashige TAYASU, Morihiro NAGARE, Kenji TANAKA, Yuma TANABE and Eiichi HIROBE

[1]正会員　博士（工学）　福井工業高等専門学校准教授（〒916-8507 福井県鯖江市下司町）
[2]非会員　修士（工学）　福井県建設技術研究センター主任研究員（〒918-8108 福井県福井市春日3-303）
[3]非会員　（株）田中地質コンサルタント（〒915-0082 福井県越前市国高2-324-7）
[4]非会員　敦賀市建設水道部道路河川課（〒914-8501 福井県敦賀市中央町2-1-1）
[5]正会員　博士（工学）　福井工業高等専門学校名誉教授（〒916-8507 福井県鯖江市下司町）

Riverside concavity zones have been installed as the water surface utilization facilities in the Asuwa River which flows through Fukui city, Fukui Prefecture. By means of the facilities, we can take the water for fire extinguishing in case of large-scale disaster and we can use the calm water surface for boat landing. Some of the facilities, however, have already lost their function because of sediment deposition and vegetation covers.

In this study, field survey and hydraulic model test have been carried out to determine the shape and placement of the training structure to reduce the sediment deposition in the facilities. Results of PIV analysis show that it is possible to transport the sediment in the facilities by the installation of the training structure.

Key Words : *Water surface utilization facility, Reduction of the sediment deposition, PIV analysis Hydraulic model test*

1．はじめに

福井市街地を流れる足羽川には，平成8年から平成20年までの期間に河川環境整備による水汲み場階段が計17箇所建設された．建設された水汲み場階段は，大規模災害時の消火用水の汲み上げ場として整備されたものであるが，一部施設においては小規模な改修を経て，水辺空間をレクリエーションの場として活用する水面利用施設となっている．しかし，これらの水面利用施設は，高水敷を凹状に引き込んだ形状であり，引き込まれた内部の水域では滞留が生じ，土砂堆積と植生の繁茂によって期待される機能を失っているものが存在している．舟着場としての利用が頻繁な施設については，草木の伐採や堆積土砂の浚渫が行われているが，利用が少ない施設については維持管理の手が行き届かない状況となっている．施設の機能を維持するためには，施設内に堆積した土砂を定期的に掘削しなければならず，土砂を堆積させない工夫が必要となっている．

足羽川に建設された水面利用施設の構造は，わんどの形状と共通する点が多い．わんどは，魚類をはじめとする水辺の生物の多様な生息・生育環境の場であり，良好な河川環境の保全・復元を目指した取り組みのポイントとなっているため，多自然川づくりにおいて施工される事例も多い．しかしながら，河川の護岸に建設されたわんどにおいては，足羽川の水面利用施設と同様，堆積土砂により埋没する事例が確認されている．

わんどの土砂堆積に関しては，わんどの形状や開口部の形状が堆積土砂量に与える影響について様々な手法により検討されている．高水敷を掘削して側岸に凹部を設けるわんど形状において，禰津ら[1)]はその流れ構造に関して，レーザー流速計およびPIV計測を用いた模型実験を行い，わんど内での流速変動周期や組織渦の発生などを明らかにしている．また，冨永ら[2)]は，わんどの開口部を遮蔽する構造物による土砂堆積抑制効果に関して，掃流砂および浮遊砂を考慮した混合砂を用いた模型実験を行い，遮蔽構造の違いによる堆積状況の差異を明らかにしている．さらに，山上ら[3)]は，わんど内の地形勾配

図-1　研究対象施設（平成26年7月1日）

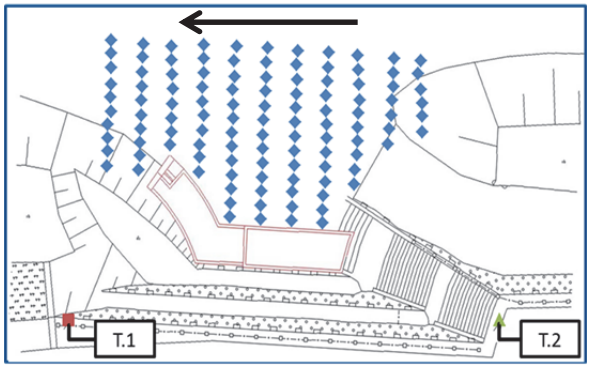


図-2　舟着場平面図と測点位置

が流れ構造に与える影響に着目し，流れ方向に対して一様な勾配をわんど内に設けた模型実験を行っている．

このように，生物の多様性の回復を目的としたわんどに関する研究は，今日まで様々な条件で多様な研究がなされている．しかし，人々が利用することを目的とした水面利用施設においては，設計段階で出水時の流れに与える影響や堆積土砂に関する検討が行われるものの，施工後の状況を詳細にモニタリングした事例も少なく，堆積土砂の軽減に対する有効な対策は示されていない．

そこで本研究では，平成25年度に舟着場として再整備された九十九橋直上流左岸の水面利用施設（図-1）を研究対象とし，施設内への土砂堆積を軽減するための対策工を，現地計測と水理模型実験によって考案することを目的とした．なお，本研究における平成26年度までの成果は，田邊ら[4]および流ら[5]（以下「既報」と称す）で報告されている．

2．現地計測

研究対象施設付近の河床勾配は 1/1820（平成22年度測量成果）であり，セグメント２に分類される．

本研究では，研究対象施設（以下「舟着場」と称す）において平成26年度に以下の３項目について現地計測を

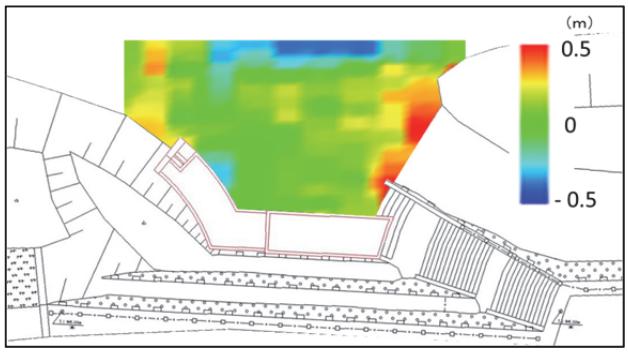


図-3　舟着場内河床標高（平成26年7月1日）

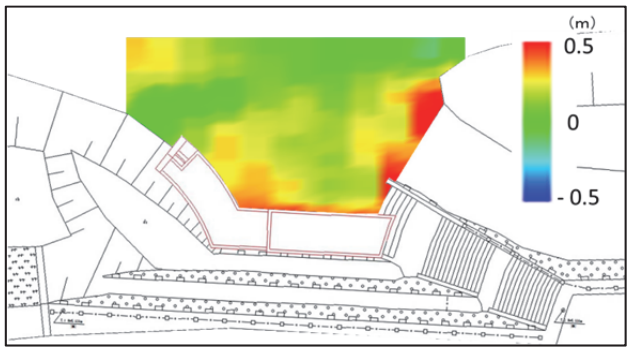


図-4　舟着場内河床標高（平成27年10月16日）

実施した．

①舟着場内と河道横断面の河床標高および周辺地形標高の測定

②舟着場内と河道横断面の流速の測定

③舟着場内堆積土砂の密度および粒径分布の測定

図-2に舟着場平面図と測点位置を示す．図中のT.1，T.2に座標基準点を設置し，２つの基準点間の測線を基準線として，基準線方向に 2.5 m 間隔，河川横断方向に1.0 m 間隔で測点を設定した（図中に◆で示した地点）．なお，舟着場内の河床標高については，平成27年度も計測したものの，舟着場の利用時に小規模な浚渫を実施しているため，堆積土砂の経年変化を正確に捉えるには至っていない．

(1) 舟着場内の河床標高

図-3，図-4に舟着場内河床標高のコンター図を示す．図-3は平成26年7月1日，図-4は平成27年10月16日における河床標高である．舟着場内の河床標高は，平成25年度の再整備施工完了時（平成26年3月末）において，T.P.± 0.0 m の高さで埋め戻しされており，図-3，図-4ともに階段およびスロープ前面での堆積が顕著であることが分かる．階段およびスロープ前面での堆積厚は，平成26年7月1日の計測時では約 50 cm ，平成27年10月16日の計測時には約 60 cm であった．

(2) 舟着場内の流速

舟着場内の流速測定は，河川横断方向に 2.0 m 間隔

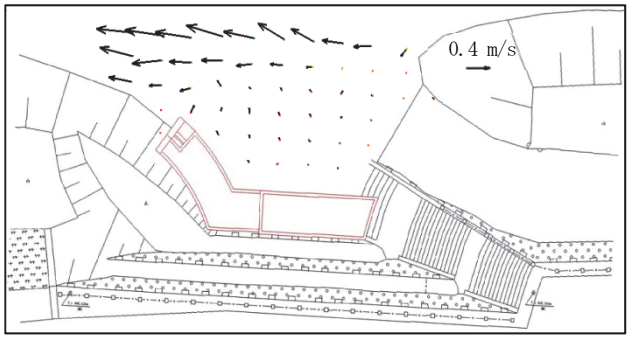


図-5　舟着場内流速 0.6 h（平成26年4月22日）

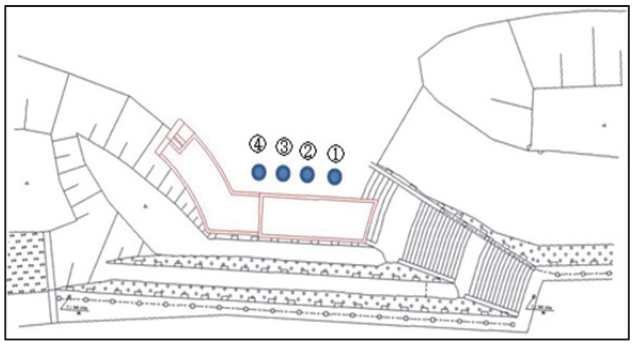


図-6　堆積土砂採取地点

の測点において河床から 0.6 h（ h は測定点の水深）の水深で計測した．流速測定時の水面標高は T.P. + 0.81 m であり，九十九橋水位観測地点における平水位 T.P. + 0.74 m を 7 cm 上回っている状況であった．図-5に舟着場内の流速ベクトル図を示す．図-5から舟着場内の下流側には流れが生じているものの，上流側の階段およびスロープ前面では流れの生じない死水域となっていることが分かる．

(3) 舟着場内堆積土砂の粒径分布

舟着場内の堆積土砂の採取は，再整備施工完了から３ヶ月後の平成26年7月1日に行った．図-6に示す舟着場内の４箇所の堆積土砂を採取し，粒径分布を測定した．図-7に採取した土砂の粒径加積曲線を示す．図-7より，舟着場内に堆積している土砂は粒径 2 mm 以下の極粗砂から 0.1 mm 程度の極細砂が主であり，質量の 70 % 程度が粒径 0.25 mm 以下であることが分かる．

３．土砂堆積軽減のための対策工の機能について

舟着場内への土砂の堆積は，出水時に上流から運ばれた土砂が舟着場内で滞留し，水位低下時に沈降して堆積することが主な原因と考えられる．図-8は平成26年8月台風11号による出水時の対象施設の状況である．また，図-9は出水から3日後における対象施設階段部の土砂堆

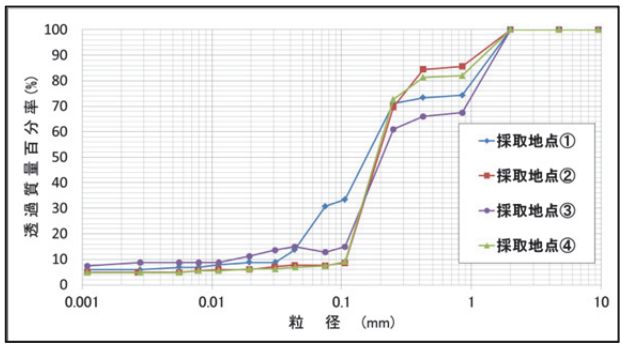


図-7　堆積土砂の粒径加積曲線

図-8　出水時の状況（平成26年8月10日）

図-9　階段等への堆積（平成26年8月13日）

積状況である．図-9に見られるような構造物上に堆積した土砂は，その後の降雨により死水域の舟着場内に流入し，沈降・堆積すると推測できる．つまり，舟着場内に土砂が堆積するのは，舟着場内に死水域が生じていることが要因であると結論づけられる．

したがって，対策工に求められる機能は，出水後の水位低下時およびその後の平水位時に舟着場内の死水域を解消することである．

４．水理模型実験

水理模型実験は，福井工業高等専門学校環境都市工学科水工学実験室の開水路実験装置（長さ 9.0 m ，幅 0.6

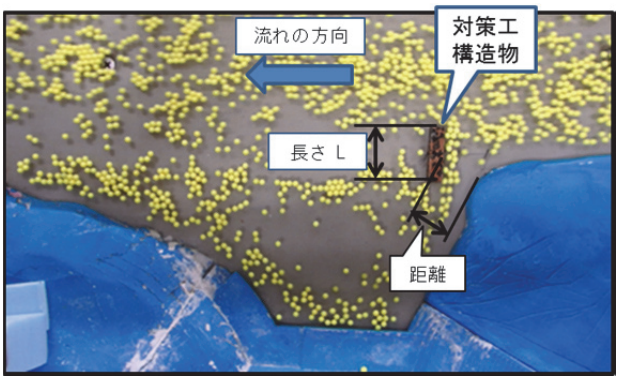


図-10　水理模型実験状況

表-1　既報における実験条件（全18ケース）

想定流況	平水位時	出水時	
模型実験流量：m^3/min	0.013	0.049	0.078
舟着場前面水深：mm (実河川換算水深：m)	11.0 (0.83)	26.0 (1.95)	40.0 (3.00)
実河川での 構造物の長さ	2.0 m		構造物なし
構造物の設置角度	45°	90°	
実河川での 河岸からの距離	約 3 m		

m，高さ 0.4 m）を使用した．模型縮尺は 1/75 とし，水路勾配を 1/2000 に設定した．舟着場やその周辺地形は，T.P. ± 0.0 m の高さが底面となるように，石膏を材料として製作した．**図-10**に模型実験の状況を示す．

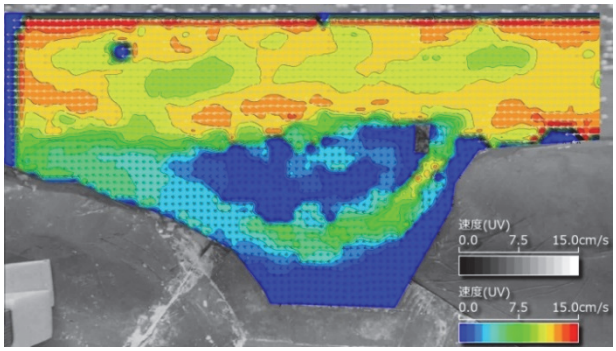
(1) 既報[4), 5)]の研究成果について

既報では，対策工構造物の形状および設置場所の違いによる舟着場内の流れのパターンを簡易な模型実験において把握し，舟着場内に流れを誘導する形状が効果的であるとの判断から，**表-1**に示した条件で実験を実施した．なお，対策工構造物の天端高さは，舟着場デッキの高さに合わせ T.P. + 1.0 m とした．また，平水位時の水深は，平成26年4月22日に現地にて舟着場内流速および河道横断面流速を測定した際の値を想定し，模型実験による流速と現地流速との比較を行った．

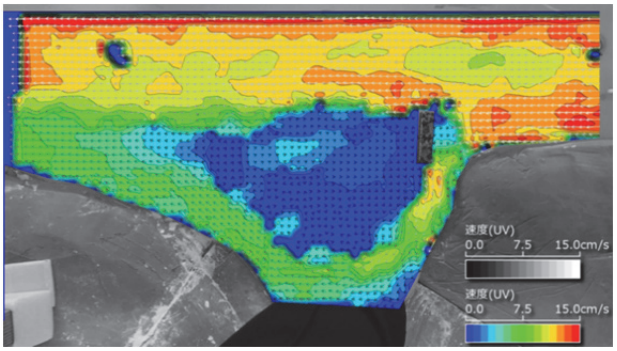
既報に示した実験では，平水位時の構造物設置角度 90° のケースで，スロープ前面における流速が 3.0 ～ 4.0 cm/s （実河川換算流速 26 ～ 34 cm/s ）という結果を得た．実験により得られた流速は，舟着場内の堆積土砂粒径に対して，浮遊している土粒子を堆積させない程度の効果が推算され，土砂の堆積を軽減することが期待できるものの，既に堆積した土砂を流下させる効果は得られないことが明らかとなった．さらに，水理模型実験による流速測定では，トレーサーに赤色インクを用いてPIV解析を実施していたため，インクの拡散が流速値へ及ぼす影響を考慮していないことが課題として挙げられる．

表-2　対策工構造物設置条件の検討（全24ケース）

想定流況	平水位時（等流）			
模型実験流量	0.021 m^3/min			
舟着場前面水深：mm (実河川換算水深：m)	11.0 (0.83)			
実河川での 構造物の長さ：m	2.0		4.0	
構造物の設置角度	45°	60°	75°	90°
実河川での 河岸からの距離：m	2.0	3.0	4.0	



a)　長さ 2 m，角度 90°，距離 3 m

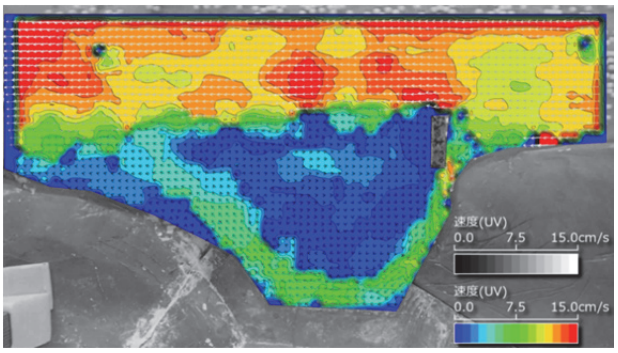


b)　長さ 4 m，角度 90°，距離 3 m

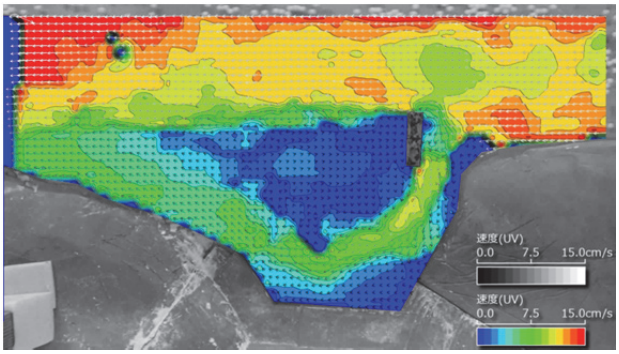
図-11　構造物の長さによる流況の違い

(2) 対策工構造物の設置条件の違いによる流況の確認

既報の研究成果を踏まえ，本研究における水理模型実験では，トレーサーを赤色インクからプラスチック球に変更した．さらに，対策工構造物の設置条件の違による舟着場内の流況の差異を明確にし，より効果の高い施設案を導くことを目的として予備実験を実施した．なお，予備実験では設置条件の違いをより明確に把握するため，模型流路内の水路床勾配と水面勾配が等しくなるように流量および水路下流端ゲートを調節し，水路内の流れを等流に近づけ，現地よりもやや大きな流速にて実験を行った．**表-2**に実験条件を示す．



a)　長さ 4 m，角度 90°，距離 2 m

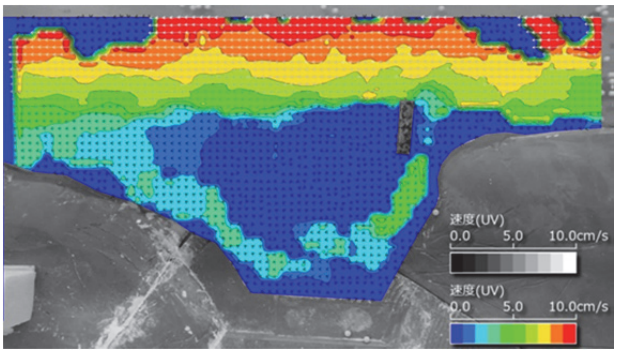


b)　長さ 4 m，角度 90°，距離 4 m

図-12　河岸からの距離による流況の違い

表-3　設置案の効果と出水時の流況確認 実験条件(全6ケース)

想定流況	平水位時	出水時	
模型実験流量：m^3/min	0.012	0.049	0.078
舟着場前面水深：mm (実河川換算水深：m)	11.0 (0.83)	26.0 (1.95)	40.0 (3.00)
実河川での 構造物の長さ	4.0 m	構造物なし	
構造物の設置角度	90°		
実河川での 河岸からの距離	3.0 m		



長さ 4 m，角度 90°，距離 3 m

図-13　平水位時の算定流量による流況

予備実験の結果の一部を流速コンター図として**図-11**, **図-12**に示す．**図-11**は，構造物の長さの違いによる流況の差異を表している．**図-11** a)とb)の比較から，構造物の長さが 2 m よりも 4 m で舟着場内への流入が多いことが分かる．**図-12** は，構造物と河岸の距離の違いによる流況の差異を表している．**図-12** a)，b)を比較すると，河岸からの距離が 2 m，4 m ともに階段およびスロープ前面に流れが近づいてはいるものの，**図-11** b)の河岸からの距離が 3 m に比べると，2 m では舟着場内の流れの幅が狭く，対策工構造物に衝突した流れの多くが河川中央へ向かって流れる様子が確認できる．**図-12** b)の距離 4 m と**図-11** b)の距離 3 m を比較すると，**図-11** b)の距離 3 m の方が階段およびスロープ前面に流れが近づいている．なお，設置角度による差異については，既報の研究成果と同様に 90° の設置角度で階段およびスロープ前面に流れが近づくことが確認できた．

表-2に示した条件における予備実験結果の比較から，舟着場内の土砂堆積軽減効果が優れているのは，構造物の長さ 4 m，舟着場デッキに対する設置角度 90°，構造物と河岸との距離 3 m の条件であった．よって，この条件を本研究における対策工構造物の設置案とする．

(3) 設置案の効果と出水時の流況確認

予備実験による検討結果から決定した設置案について，平水位時および出水時を想定した実験を実施した．

平水位時の流量は，対象施設から 23.5 km 上流の天神橋流量観測所におけるデータを参考とし，平成26年4月22日の現地計測にて測定した河道横断面地形および河道横断面流速を考慮し，予備実験での流量の約６割とした．**表-3**に設置案における実験条件を示す．

図-13に対策工構造物を設置した平水位時のケースにおける流速コンター図を示す．ここで，**図-13**のコンター図では，カラーマップの最大値を予備実験結果の**図-11**，**図-12**よりも小さく設定している点に注意が必要である．**図-13**を見ると，予備実験時に比べて流量が小さいため，舟着場内に流れ込む流れも小さくなっているものの，舟着場内の流れは階段およびスロープ前面に沿って流れている．図中の階段およびスロープ前面における流速は約 5 cm/s であり，実河川での流速に換算すると約 43 cm/s となる．なお，対策工構造物を設置しない場合の平水位時の流速コンターについて，現地計測にて得られた河道横断面流速，舟着場内流速と比較した結果，概ね一致することを確認した．さらに，出水時の実験結果においては，対策工構造物の天端（天端高さ T.P. + 1.0 m ）を越流して流れるため，舟着場内やその周辺の流れ場に大きな変化を与えていないことを確認した．

５．土砂堆積軽減効果の推算

本研究では，水理模型実験に使用した開水路実験装置に移動床流れを実施するシステムを構築することが困難

であったため，実験による土砂移動の確認はできていない．しかし，対策工構造物設置案の模型実験により，平水位時において舟着場内の階段およびスロープ前面での流速は，約 43 cm/s となることが確認できた．また，舟着場内に堆積した土砂は**図-7**より，質量の 90 % 程度が粒径 1 mm 以下となっている．以上のことから，対策工構造物の設置によって，堆積した土砂の侵食・運搬が可能であるかを推算すると，底面せん断応力（掃流力）τ_b は**式**(1)から算出することが可能であり，舟着場内の流速 u を 43 cm/s，水深 h を 0.825 m，舟着場内河床の粗度係数 n を 0.025 $m^{-1/3}s$（底質粒径 2 mm 以下の細砂で植生なしの水路と想定），重力加速度 g を 9.80 m/s^2 として計算すると，約 1.21 N/m^2 となる．

$$\tau_b = \frac{\rho n^2 g u^2}{h^{1/3}} \quad (1)$$

さらに，粒径 d が 1 mm の土粒子の移動限界摩擦速度 $u_{*c}{}^2$ を岩垣公式により算出し，限界掃流力 τ_c を**式**(2)により求めると，0.55 N/m^2 となる．

$$\tau_c = \rho {u_{*c}}^2 \quad (2)$$

ここに，ρ：水の密度．

したがって，粒径が 1 mm 以下の堆積土砂においては，限界掃流力よりも底面せん断応力が大きくなり，舟着場内の階段およびスロープ前面に堆積した土砂を侵食・運搬することができると推算される．

図-14に侵食・運搬・堆積の関係を粒径と流速で表したユルストローム図を示す．図においても，粒径 1 mm の場合，堆積している土砂を侵食・運搬するには約 40 cm/s の流速が必要であることが分かる．よって，本研究の模型実験で得られた結果から，**表-3**に示した設置案で対策工構造物を設置した場合，平水位時において舟着場内に堆積している土砂の90 % 程度は侵食・運搬が可能と考えられる．

6．おわりに

本研究では，足羽川の水面利用施設における土砂堆積を軽減するための対策工について検討を行った．九十九橋直上流左岸の舟着場として再整備された施設を研究対象に，現地計測および水理模型実験を実施した．現地計測においては，舟着場内の階段およびスロープ前面で堆積が顕著であり，流れの生じない死水域となっていることを確認した．水理模型実験では舟着場内の死水域を解消する対策を検討し，舟着場前面に対策工構造物を設置することで舟着場内に流れを導き，堆積土砂の軽減が可能であることを確認した．

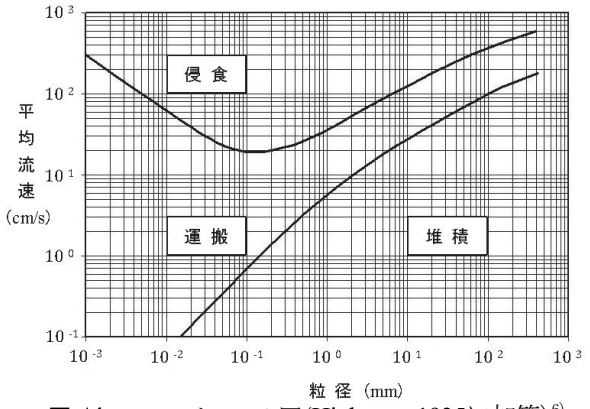


図-14 ユルストローム図(Hjulström,1935に加筆)[6]

なお，この研究結果を受けて，福井県は対策工の施工を決定し，平成28年3月に施工が完了した．今後は本研究の検証として現地にてモニタリングを行う予定である．

謝辞：本研究を実施する上で，名古屋工業大学大学院 冨永晃宏 教授，福井県建設技術研究センター 脇本幹雄 所長に貴重なご助言・ご指導を頂いた．また，現地計測の際には，福井県建設技術研究センター 前田健児 氏，(株)田中地質コンサルタント 長岡達哉 氏にご協力頂いた．ここに記して心より謝意を表します．

参考文献

1) 禰津家久，鬼束幸樹，高橋俊介，乙志和孝：開水路側壁凹部流れの水面・流速変動と開口部形状の効果，土木学会論文集, No.712/II-60, pp.1-10, 2002.
2) 冨永晃宏，堀部扶実，榊卓也：わんどの開口部遮蔽による土砂体積抑制効果，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67, No.4, I_1057- I_1062, 2011.
3) 山上路生，禰津家久，鈴木壮平，池内三津喜：ワンド床の勾配が水理特性と乱流物質輸送に与える影響に関する基礎的研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68, No.2, pp.90-102, 2012.
4) 田邊祐真，田安正茂，流 守博，田中謙次，廣部英一：足羽川舟着場の土砂堆積抑制に関する模型実験による検討，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.70, II-060, pp.119-120, 2015.
5) 流 守博，田安正茂，廣部英一，田中謙次，田邊祐真：足羽川の水面利用施設の土砂堆積軽減に関する研究（その１），福井県建設技術研究センター成果報告（平成26年度），http://www.fklab.fukui.fukui.jp/yk/publication/download/2016/1_asuwagawa1-H26-1.pdf
6) Hjulström, F.: Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, *Geological Institute University of Uppsala Bulletin*, Vol.25, pp.221-527, 1935.

(2016.4.4 受付)