

単断面河道における護岸粗度の抵抗特性と 中小急流河川の護岸設計に関する一考察

FRICION CHARACTERISTIC OF REVETMENT ROUGHNESS ON RIVER
CHANNEL OF SINGLE SECTION AND CONSIDERATION OF REVETMENT
DESIGN METHOD ON SMALL-AND-MEDIUM-SIZED RIVERS OF RAPID FLOW

原田守啓¹・藤田裕一郎²
Morihiro HARADA, Yuichiro FUJITA

¹正会員 工修 大日コンサルタント株式会社 環境・水工部 (〒500-8384 岐阜県岐阜市藪田南3-1-21)

²フェロー 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

Steep gradient revetment is used in general for the countermeasure of flood control structure after the damage by disaster on small-and-medium-sized rivers of rapid flow. However it happens sometimes to make stream channel erosion around the revetment at river channel of single section. It is not clear that roughness of steep gradient revetment effect the local velocity around revetment. This paper presents some results of an experimental investigation with artificial strip roughness for the purpose of friction characteristic of revetment roughness.

Key Words : revetment, friction characteristic, roughness index, artificial strip roughness

1. はじめに

掘込河道の中小河川の改修では、河川断面を単断面とし、河床を下げ、両岸を立ち護岸とする計画が一般的である。これは、河川断面を水理学的経済断面に近づけることを意味し、限られた用地内で最大限の流下能力を確保するための合理的な改修方法であると考えられる。

しかしながら、一般に護岸の粗度は自然河岸と比べて小さく、改修後の急流河川では、出水中の河床掃流力が上昇し、河床が低下して護岸の被害を生じるケースや、流水の運動量の増加に伴って、落差工・斜路工直下や湾曲部等の流水運動の方向変化点における作用力が増大して構造物被害につながるケースなど、断面積増加と河岸保護の両面で流下能力を追及した改修の結果、写真-1のように、逆に河道の安定が損なわれ、河道災害を生じたと考えられるケースも少なくない。



写真-1 改修後の中小急流河川における河道災害の例

また、改修後の出水によって低下した河床高を維持するために、追加で護床工や根固工を整備した事例、河床低下によって露出した護岸基礎を保護するために施工した根継工が、さらなる河床低下を招いた事例等、改修が河床低下を誘引して追加投資が必要となるケースもみられ、「河道の安定」を改めて計画に織り込んでおくことが急流河川における河道改修の大きな課題であると考えられる。

この点に関し、「中小河川に関する河道計画の技術基準について」（平成20年3月31日国土交通省河川局）では、「河床を下げず、川幅を拡げて流下能力を確保する」ことにより、掃流力を上げない改修を基本方針の一つとして提示している。

しかしながら、改修を必要とする中小河川において新たな技術基準に則った改修を進めようとした場合、現実的な課題も多い。例えば、狭隘な山間地において限られた土地を河川用地として取得することは必ずしも容易でないこと、河川断面を拡幅するためには橋梁、取水施設等の既設構造物の改築を必要とする場合が多々あること等である。そのため、やむを得なく従来の改修方法である「単断面・河道掘削・立ち護岸」によらざるを得ない河川も少なくない。

川幅水深比が小さい単断面河道では、洪水時に護岸の潤辺に占める割合が大きくなるため、護岸粗度が出水時の流水の減勢と河道の安定に果たす役割は無視できない

ものと見なされ、護岸設計実務の拠り所となっている「護岸の力学設計法」では、平成19年に改訂版¹⁾において、護岸には適切な粗度を設けること、中小河川単断面河道においては側岸の粗度を考慮した合成粗度係数（等価粗度係数）によって水理計算を行い、設計流速を算出することを改訂の主旨の一つに唱っている。

護岸の力学設計法に則って護岸・根固工の安定性を照査する場合には、護岸ブロックの水理学的特性を示す抗力係数、揚力係数などの定数が必要であるが、これらを各種の製品について系統的に計測・整理するための試験法²³⁾が整備され、多くの製品について水理特性値を用いることが可能になりつつある。

このように、中小河川における河道計画及び護岸設計についての技術体系は整備されつつあるが、護岸の粗度の取り扱いについては、粗度要素を底面に配置した場合の実測抵抗特性が、側壁に配置した場合にも法勾配等に関係なく同様に作用することを前提としている。

単断面河道の流れについては、最大流速点のもぐりこみは古くから知られており、これは川幅水深比及び側壁の勾配に応じて生じる二次流に起因すると考えられていて、例えば、富永⁴⁾はそれを詳細に計測している。

しかしながら、側壁に配置した粗度要素が底面の粗度と同様の抵抗特性を発揮するという前提が、このような三次元性の強い流れ構造を有する流況下においても成立しているかを綿密に検討・確認した事例はないように見られる。

そこで本研究は、護岸の粗度が出水時の流水の減勢と河道の安定に果たす役割が大きいと考えられる①単断面河道、②洪水時の川幅水深比が10以下、③セグメントM～1に分類される河川条件を想定し、粗度特性について多くの知見⁵⁶⁾が得られている栈粗度を用いた水理実験を行い、底面と側面に配置した栈粗度の抵抗特性について考察した結果を報告する。

2. 実験方法と実験条件

(1) 実験水路の概要

実験は、全長16.8m、幅1.8mの鋼製水路の中に、塗装木材を用いた長さ9.0mの側壁勾配可変の木製水路を約10cm浮かせた形で設置して実施した。

水路は底面を幅40cmとし、側壁板を底板にヒンジ構造で接合し、法勾配が適宜変更できる構造とした。縦断勾配は急流河川を想定して $I_b=1/125$ とし、設置粗度に合わせて水路下流端で適宜堰上げ、可能な限り等流に近い条件での計測ができるようにした。

流水の供給には3相交流3.7kWのポンプ4台を用い、うち2台を汎用インバータで出力調整して、約40～80L/sの間で自由に流量を設定するものとした。流量は、上流端に設置したJIS準拠の四角堰検定水槽より求めた。

(2) 粗度要素の設定

底面及び側壁に配置する栈型粗度要素は粗度高さ $h_g=14\text{mm}$ の正方形断面とし、設置間隔は少ない粗度要素でできるだけ大きな粗度効果を発揮させるために既往文献²⁾を参照して検討し、 $h_d/h_g=12$ となる $h_d=168\text{mm}$ とした。

(3) 観測機器及び観測値の整理方法

a) 水深

水路中央区間の等流状態に最も近いとみなされる3m区間を対象とし、0.25m間隔計13点について、ポイントゲージにより測定して、水深を求めた。

水深の計測値から、エネルギー勾配、断面平均流速、潤辺長等を求め、完全な等流条件ではないため、エネルギー勾配に基づいてManningの粗度係数 n を逆算した。

b) 断面内流速分布

流速は、水深計測区間の中央付近に位置する栈型粗度上の断面と、粗度間隔の1/3下流、2/3下流の計3断面について、3次元電磁流速計（ケネック製VM-1001RS、プローブ径13mm）により、断面内の3軸方向の時間平均流速分布を計測した。

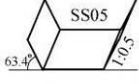
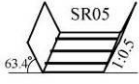
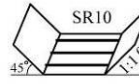
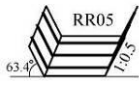
本測定に先立って、横断方向の流速分布を測定した結果、流れの対称性がほぼ満足されていたため、左岸側のみで測定した。

測定時間は、あらかじめ周期的な乱れの有無を確認した結果を踏まえて10秒とし、100Hzでサンプリングして1点あたり1000個の流速値を得た。

(4) 実験ケース

実験ケースは、粗度を設置しない滑面のケース(SS)、底面のみ栈粗度を設置したケース(SR)、側壁及び底面に設置したケース(RR)の3通りを基本とし、ケースSR及びRRについては、側壁勾配の効果を検討するため、1:0.5と1:1.0の2通りを行った。流量は各ケースについて3通り与え、計15ケースとした。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件一覧表

Case	粗度	法勾配	縦断勾配		流量
			I _b	Q	
			—	ℓ/s	
SS05	なし	1:0.5	8.00E-03 (1/125)	40.2	
				57.9	
				76.4	
SR05	底面のみ	1:0.5	8.00E-03 (1/125)	40.2	
				58.3	
				76.4	
SR10	底面のみ	1:1.0	8.00E-03 (1/125)	40.0	
				57.9	
				61.5	
RR05	全面	1:0.5	8.00E-03 (1/125)	18.9	
				39.9	
				58.5	
RR10	全面	1:1.0	8.00E-03 (1/125)	33.6	
				39.9	
				52.0	

断面内流速分布は、SR05,SR10,RR05,RR10について、それぞれ流量が最も大きいケースについてのみ計測した。

ケースSSは栈粗度を設置しない状態の滑面の粗度特性の把握を目的としたものであり、ケースSRは底面に対して側壁の粗度係数が小さく、改修によって側岸の粗度が低下した状況、ケースRRは河岸が河床面と同程度の粗度を有する状況を想定したものである。

3. 実験結果及び考察

(1) 実験粗度係数

各ケースで得られた水深、エネルギー勾配、断面平均流速、Manningの粗度係数 n 等を表-2に示す。

粗度を設置していないSS05の粗度係数はばらつきは少なく、 $n=0.0089\sim0.0093$ であり、潤辺は滑面のみで構成されているといえる。

底面のみ栈粗度を配置したSR05, SR10では、流量の少ないケースで $n=0.027$ 程度の値を取り、水深が増加するにつれて粗度係数の低下がみられた。水深の増加に伴い、滑面で構成される側壁潤辺長の割合が増加することから、妥当な結果といえる。

底面及び側壁に同様の栈粗度を配置したRR05, RR10では、SRシリーズと同様に、水深の増加に伴って粗度係数が右肩下がりになる傾向がみられ、法勾配が1:0.5のRR05シリーズにおいてより顕著であった。

粗度設置の底面が潤辺長に占める割合と粗度係数との関係を検討するため、 S/B （潤辺長/底面幅）を指標として実験結果を整理すると図-1のようである。

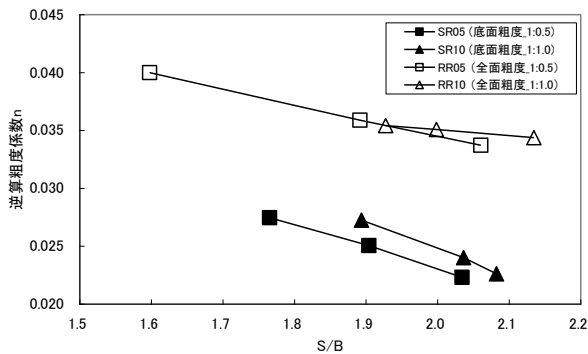


図-1 S/B （潤辺長/底面幅）と実験粗度係数の関係

(2) 栈粗度特性の評価

中小河川における河道計画・護岸設計実務に用いられる合成粗度係数は、流下断面を各潤辺 S_i と各潤辺の粗度係数 n_i に支配される領域に分割し、「各分割面積部分の平均流速は互いに等しく、かつ全体の平均流速に等しい」との仮定に基づき、以下の式で表される。

$$n = \left[\frac{\sum S_i n_i^{3/2}}{S} \right]^{2/3} \quad (1)$$

(1)式が成立していれば、底面と側壁に同様の粗度要素が配置されていれば、流量の変化に伴って潤辺長が変化しても、粗度係数是不変であるが、本実験では全面に同様の栈粗度を配置したケースにおいても、粗度係数の変化がみられたことから、この傾向が栈粗度の特性によるものとして、以下の検討を加えた。

足立⁵⁾は、砂粒粗度が $6.3 \leq H/k \leq 330$ のかなり広い領域において粗度係数 n がほぼ一定値となるのに対し、栈粗度による粗度係数は、栈粗度間隔及び水深と粗度高さの比に大きく影響されることを示しており、栈型粗度の二次元対数法則を(2)式にまとめている。なお、本式の適用領域は $8 \leq h_d/h_g \leq 160$ であり、式中の H は鉛直二次元流れの水利水深を示す。

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \left[\left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{h_d}{h_g} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{h_g} + 1.50 \log_{10} \frac{h_d}{h_g} - 1.91 \right] \right. \quad (2)$$

本実験で観測された粗度係数の変化が、栈粗度の抵抗特性によるものか確認するため、(2)式に実験計測値を代入して、粗度係数 n を算出した。

実験水路の条件より、 $h_g=0.014\text{m}$ 、 $h_d=0.168\text{m}$ として、栈粗度を底面のみ配置したSR05, SR10については、底面の粗度が滑面である側壁に対して卓越していると考え、(2)式の H に水深 h を適用した値を底面の粗度係数とみなし、側壁の粗度係数との合成粗度係数を求めた。

全面に栈粗度を配置したRR05,RR10については、(2)式に径深 R を適用して粗度係数を推定した。（図-2,3）

表-2 水深測定結果に基づく実験粗度係数

Case	粗度	法勾配	流量	水深	底面幅	水面幅	川幅 水深比		断面平均 流速	Reynolds数	Froude数	縦断勾配	エネルギー 勾配	断面積	潤辺長	径深	摩擦速度	実験 粗度係数
			Q ℓ/s	h cm	B cm	T cm	B/h -	T/h -	U_m cm/s	Re (4R U_m /ν)	Fr -	I_b -	I_e -	A cm ²	S cm	R cm	U^* cm/s	n -
SS05	なし	1:0.5	40.2	6.8	40.0	46.8	5.9	6.9	137.2	2.59E+04	1.90	8.00E-03	8.22E-03	293.0	55.1	5.3	6.55	0.0093
			57.9	8.4	40.0	48.4	4.8	5.8	156.1	3.50E+04	1.98	8.00E-03	8.22E-03	371.2	58.8	6.3	7.13	0.0090
			76.4	9.8	40.0	50.8	4.1	5.2	172.7	4.37E+04	2.07	8.00E-03	8.22E-03	442.4	62.0	7.1	7.58	0.0089
SR05	底面のみ	1:0.5	40.2	13.7	40.0	53.7	2.9	3.9	62.6	2.06E+04	0.66	8.00E-03	7.25E-03	641.2	70.6	9.1	8.03	0.0275
			58.3	16.2	40.0	56.2	2.5	3.5	74.9	2.76E+04	0.75	8.00E-03	7.38E-03	777.7	76.2	10.2	8.59	0.0251
			76.4	18.5	40.0	58.5	2.2	3.2	83.8	3.39E+04	0.80	8.00E-03	6.48E-03	911.2	81.4	11.2	8.43	0.0223
SR10	底面のみ	1:1.0	40.0	12.6	40.0	65.3	3.2	5.2	60.2	1.84E+04	0.65	8.00E-03	6.89E-03	665.3	75.7	8.8	7.70	0.0273
			57.9	14.7	40.0	69.3	2.7	4.7	72.3	2.48E+04	0.74	8.00E-03	6.65E-03	801.0	81.5	9.8	8.00	0.0240
			61.5	15.3	40.0	70.6	2.6	4.6	72.6	2.57E+04	0.73	8.00E-03	5.69E-03	846.6	83.3	10.2	7.53	0.0226
RR05	全面	1:0.5	18.9	10.7	40.0	50.7	3.7	4.7	38.9	9.92E+03	0.45	8.00E-03	7.56E-03	484.7	63.9	7.6	7.49	0.0400
			39.9	15.9	40.0	55.9	2.5	3.5	52.2	1.77E+04	0.52	8.00E-03	7.45E-03	765.1	75.7	10.1	8.59	0.0359
			58.5	19.0	40.0	59.0	2.1	3.1	62.3	2.38E+04	0.59	8.00E-03	8.00E-03	938.6	82.4	11.4	9.45	0.0337
RR10	全面	1:1.0	33.6	13.1	40.0	66.2	3.0	5.0	48.3	1.47E+04	0.51	8.00E-03	7.21E-03	696.6	77.1	9.0	7.99	0.0354
			39.9	14.1	40.0	68.2	2.8	4.8	52.2	1.68E+04	0.54	8.00E-03	7.67E-03	764.2	79.9	9.6	8.48	0.0351
			52.0	16.0	40.0	72.1	2.5	4.5	57.8	2.05E+04	0.57	8.00E-03	7.94E-03	899.2	85.4	10.5	9.05	0.0344

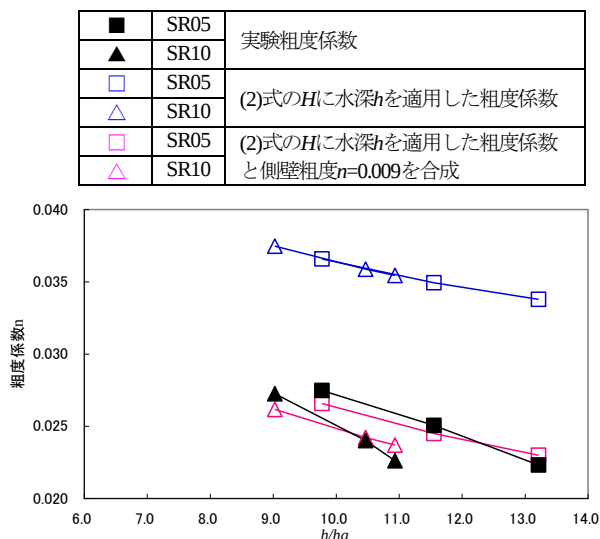


図-2 実験粗度係数と(2)式の対応(底面設置)

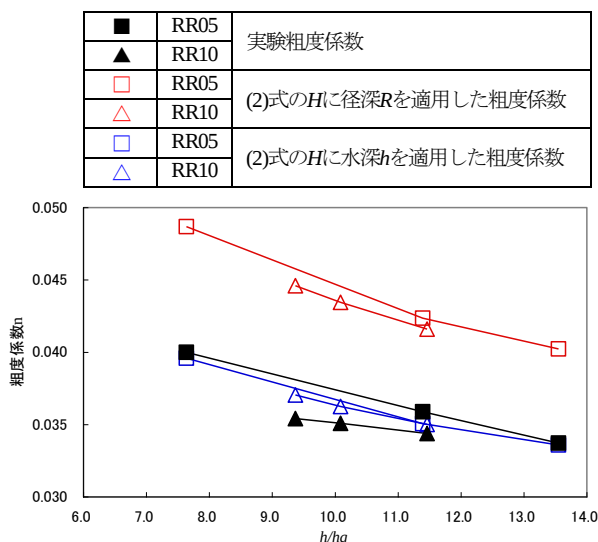


図-3 実験粗度係数と(2)式の対応(全面設置)

底面粗度のみのSR05,SR10については、水深を用いて求めた(2)式の値は実験粗度係数より非常に大きい値となった。この値を底面粗度の粗度係数とみなし、側岸の粗度係数については、SR05の実験粗度係数より、滑面の粗度係数を $n_1=0.009$ と仮定し、(1)式を用いて合成粗度係数を求めたところ、図-2に示すとおり実験値と良好な一致をみた。

一方、全面粗度のRR05,RR10については、底面・側壁の粗度が全て等しく作用することを前提として(2)式に径深 R を適用したところ、実験粗度係数より非常に大きい値となった。次に、水深 h を適用したところ、図-3に示すとおり比較的よく一致した。ただし、RR10の実験粗度係数はさらに低い値となっていた。

これらの検討結果から、水深の増加に対し、実験粗度係数が低下する傾向(図-1)は、粗度高さに対する相対

水深の増加によって、粗度の抵抗が減少する特性による度合いが大きいと判断された。

底面のみに粗度を配置したケース(SR05, SR10)では、合成粗度係数は実験粗度係数の傾向をよく表現できることがわかった。一方、全面に粗度を配置したケース(RR05, RR10)では、径深 R を用いた推定値より水深 h を用いた推定値の方が実験粗度係数と比較的よく一致したことから、側壁の粗度は流れに対して、底面の粗度とは異なる影響を流れに及ぼしていると考えられる。

また、法勾配1:1.0のRR10は水深を用いた推定値より実験粗度がさらに低かった。粗度抵抗特性についての従来の知見は比較的縦断勾配が小さい条件下で蓄積されたものである一方、縦断勾配が大きい条件下における抵抗特性は従来の知見と異なることが確認⁷⁾されつつあり、(2)式の適用範囲についても今後検討が必要である。

(3) 断面内流況の測定結果

粗度を底面のみに配置した場合と全面に配置した場合の効果の違いを確認するため、SR05,SR10,RR05,RR10のうち、それぞれ流量が最も大きいケースについて断面内の流速分布を測定した。

各ケース3断面の計測結果から、主流速成分のカラーコンター図と水路中心における鉛直二次元流速ベクトル図を下流側から鳥瞰した図を図-4～7に示す。なお、側壁近傍は電磁流速計の計測点を階段状に配置したため、等流速線を図化する際に多少の凹凸が生じている。また、電磁流速計の特性から、水面の近傍については計測できていない。

水路中心位置における鉛直二次元分布に着目すると、全てのケースに共通して粗度直上では上昇する流れ、粗度後方では底面に向けて下降する流れが確認された。下降流は側岸勾配が1:0.5のSR05,RR05の方が1:1.0のSR10,RR10より強かった。

また、全てのケースにおいて最大流速点のもぐりこみが確認された。最大流速点のもぐりこみがもっとも顕著であったRR10(図-7)では、側壁近傍の流速が小さく、死水域に近い状態となっている。一方、水面近傍には、側壁の粗度の後方に緩い流れではあるが安定した水平渦(写真-2)が定常的に存在しており、側壁近傍の遅い流れが水平渦によって水路中心にむけて運ばれているために、水面近傍の流速が低下するとともに、最大流速点が一層もぐりこんだものと考えられる。

また、SR05では水深スケールの並列らせん流が発生しており、最大流速点が水路中心より脇にそれた位置に確認された。

図-8に、SR05の粗度直上断面における主流速成分のカラーコンターと、実測二次元流速ベクトルを示す。水路中心部で強い上昇流、底面幅1/4ほどずれた位置に下降流がみられ、最大流速点が水面から水深の1/3程度までもぐりこんでいる。最大流速点の位置は計測した3

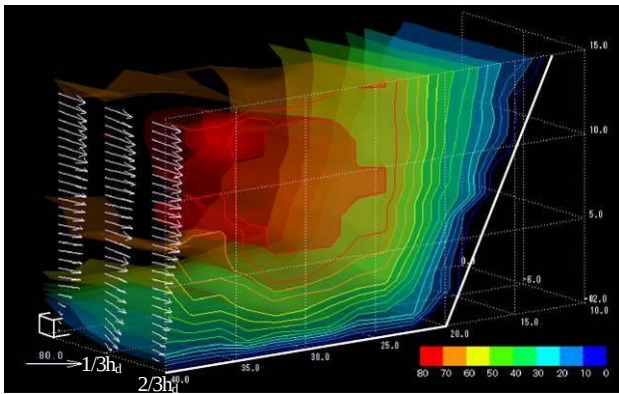


図-4 SR05の流れの構造の可視化

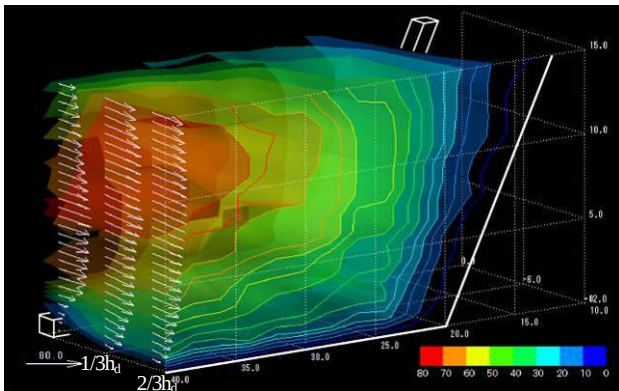


図-5 RR05の流れの構造の可視化

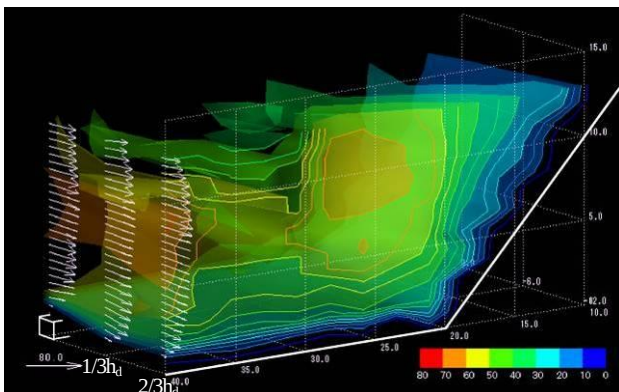


図-6 SR10の流れの構造の可視化

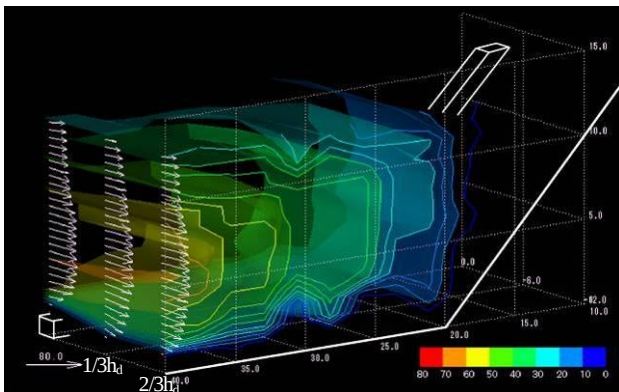


図-7 RR10の流れの構造の可視化



写真-2 側壁粗度後方の水面近傍の水平渦 (RR10)

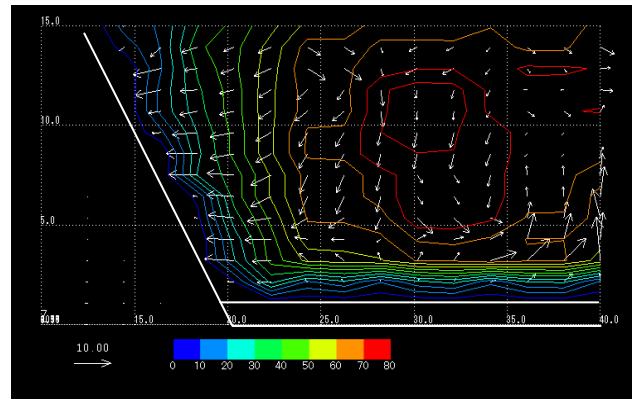


図-8 粗度直上断面における二次流分布 (SR05)

断面で概ね一致しており、規則的に配置された粗度から供給される乱れが安定したらせん流を形成していると考えられる。なお、粗度直上断面の図-8では側壁に向かう流れがみられるが、次の粗度の手前の断面では、側岸から水路中心部の底面に向かう流れが見られ、観測された二次流の構造は流下方向に一樣ではなく、粗度間隔に対応した周期的な構造を有することが示唆された。

次に、側壁に配置した粗度の効果について考察するため、側壁近傍の流速に着目する。

全てのケースにおいて、底面付近の流速と比較して、側壁付近の流速が小さく、とくにRR10 (図-7) ではその傾向が顕著である。

これらの観測結果は、側壁の粗度に対する接近流速が底面の粗度に対するものと比較して相対的に小さく、粗度要素に作用する流体力が小さいことを示唆しているが、側壁の粗度が粗度としての効果を発揮していないわけではなく、側壁近傍の低流速域が拡大することによって流下断面を狭め、結果として底面のみに粗度を配置したケースと比較して、実験粗度係数が上昇している。

(4) 平均化した鉛直流速分布

観測された流れはいずれも三次元的な流況を呈しているにも関わらず、図-2, 3に示したとおり、鉛直二次元対数則に基づく(2)式が多くの場合、実験粗度係数とよく一致したことについて考察するため、流速分布の測定結果

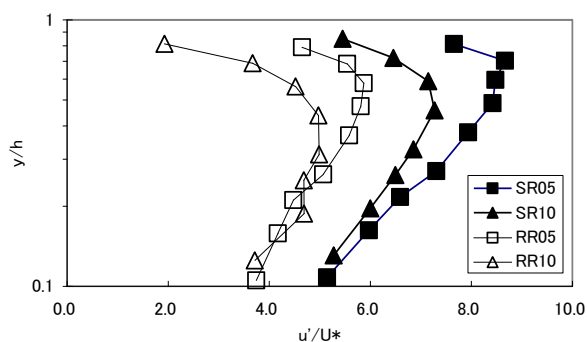


図-9 平均化した鉛直流速分布

から、側壁付近を除く領域内について、底面からの同一の高さの計測値を平均して、領域内の空間平均的な鉛直流速分布を求めた。

その結果は図-9のようであって、いずれのケースにおいても、低層領域に対数則にしたがう分布がみられた。このことは、二次流により質量・運動量が移送される流れにおいても、空間平均的には対数則が成立する領域が底面粗度近傍に存在していることを示していること、したがって、鉛直二次元対数則に則って整理された(2)式によって実験粗度係数の傾向がある程度説明が可能であることを示す。

4. 結論と課題

本研究は、単断面・立ち護岸を有する急流河川の河道を模した水路の底面及び側壁に栈粗度を配置した実験を行い、粗度係数の傾向について整理し、流速分布の測定値を用いて、底面と側面に配置した栈粗度の抵抗特性について考察した。

以下に主な結論を示す。

- (1) 栈粗度を用いた水理実験から得られた粗度係数は、水深が増加するほど低下する傾向を示した。この傾向は粗度高さに対する相対水深により粗度係数が変化する栈粗度の抵抗特性によって説明される。
- (2) 底面に栈粗度を配置し、側壁を滑面とした実験では、三次元的な流れ構造が確認されたが、鉛直二次元対数法則に基づく足立式により推定した底面の粗度係数と側壁の粗度係数の合成粗度係数は、実験粗度係数とよく一致した。
- (3) 全面に栈粗度を配置した実験における流速分布の測定結果から、側壁栈粗度が流れに及ぼす影響は底面栈粗度とは異なり、側壁近傍の低流速域が拡大することによって、見た目の粗度係数を上昇させていることを確認した。
- (4) 各実験ケースともに三次元的な流況を呈していたが、流速の鉛直分布を空間平均した結果、低層領域では乱流対数則が成立していることが確認された。

また、これらの結論を踏まえ、中小急流河川の河道計

画及び護岸設計における粗度係数の取り扱いについて考察する。

実務に用いられる合成粗度係数は、護岸に配置した粗度要素が底面に配置した際と同様に作用することを前提とし、また、各潤辺が支配する領域における平均流速が等しいという仮定に基づいている。

本実験は、栈粗度に限定したものではあるが、側壁の栈粗度は、流れに対して底面の栈粗度とは異なる作用を及ぼしていることが確認された。

このため、底面に配置した状態で計測された粗度要素の抵抗特性が、護岸法面に配置した際にも同様に成立しているか、精査する必要があると考える。計画した粗度が河道に確保されていないとすれば、河道の流下能力は増加するが、河床面に作用する掃流力も大きくなり、河床の安定がより損なわれる方向に働くためである。

最後に、本研究の課題を示す。本研究は、固定床・栈型粗度という限られた実験条件における結果に基づくものであり、栈粗度の抵抗特性が強く現れたものである。

栈粗度以外の粗度要素についても同様の現象がみられるか、検証する必要がある。また、実河川の河床と護岸の粗度の比を再現したものではないことから、今後、実河川と相似した実験等を行い、中小急流河川における安全で経済的な改修方法を見出す一助としていきたい。

謝辞：本研究の動機付けと方向性に深い示唆を与えていただきました（独）土木研究所自然共生研究センター・センター長萱場祐一氏に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人土木技術センター：改訂護岸の力学設計法，山海堂，2007。
- 2) 建設省土木研究所河川部河川研究室：護岸法覆工の水理設計法に関する研究，土木研究所資料第2635号，1988。
- 3) 財団法人土木研究センター：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル（第2版），2003。
- 4) 富永晃宏，江崎一博，祢津家久：台形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文集，第381号/II-7, pp.55-63, 1987。
- 5) 足立昭平：固定床河川模型水路の人工粗度に関する研究，京都大学博士論文，pp.3.1-16，1961。
- 6) 富永晃宏：栈粗度の相対栈間隔が開水路の乱流構造に及ぼす影響，水工学論文集，第36巻，pp.163-168，1992。
- 7) 山中貴之，石井南，原田守啓，藤田裕一郎：山間部急流河川における流水エネルギー減勢に関する実験的研究，第64回年次学術講演会，II-48，2009。

(2009. 9. 30受付)