

中小急流河川における護岸粗度の抵抗特性に関する一考察

CONSIDERATION OF FRICTION CHARACTERISTIC OF REVETMENT ROUGHNESS ON SMALL-AND-MEDIUM-SIZED RIVERS OF RAPID FLOW

原田守啓¹・藤田裕一郎²・山中貴之³

Morihiro HARADA, Yuichiro FUJITA, Takayuki YAMANAKA

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)

³工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 中部支社 (〒451-0046 愛知県名古屋市中区牛島町2番5号)

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, aspect ratio, aspect effect*

1. はじめに

掘込河道の中小河川では、河道拡幅を最小限とし、単断面として河床を下げ、両岸を立ち護岸とする改修が一般的である。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。

しかしながら、通常、護岸の粗度は自然河岸と比べて小さいため、改修後の急流河川では、出水中の掃流力が上昇し、河床変動が激化して護岸の被害に繋がるケースや、流水の運動量が増加するため、落差工・斜路工直下や湾曲部等における運動量の変化に伴う作用力の増大によって構造物被害が生じるケースなど、写真-1のように、河道の安定が損なわれ、河道災害に至ったと考えられるケースも少なくない。

そのため、急流河川の河道改修においては、計画構造物の力学的な照査にとどまらず、改修後の「河道の安定」を損なわないように計画することが重要である。

この点に関し、「中小河川に関する河道計画の技術基準」¹⁾では、河床を下げず、川幅を拡げて流下能力を確保して、掃流力を上げない改修が基本方針の一つとして提示されているが、このような改修を進めるには現実的な制約も多く、やむを得なく従来通り「単断面・河道掘



写真-1 改修後の中小急流河川における河道災害の例
(平成16年台風第23号出水、岐阜県飛騨地方)

削・立ち護岸」により改修せざるを得ない河川も現状では少なくないと考えられる。

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「改訂護岸の力学設計法」²⁾では、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。

また、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際に用いる、護岸ブロックの水理学的特性

の試験法³⁾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、中小急流河川の河道の安定の観点からは、河道計画手法についての技術的な検証・改良の余地があるように思われる。

著者らは、中小急流河川の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護岸の粗度の抵抗特性と河道計画時点の粗度の評価法に着目して研究を進めており、先行して実施した中小急流河川の単断面河道を模した水路に棧型粗度を配置した水理実験においても、急勾配の法面に設置した粗度要素が水路幅水深比が小さい水路内の流況に与える作用は、同じ粗度要素を底面に配置した際とは異なることが確認されている⁵⁾⁶⁾。

本研究では、急流中小河川の流勢の減勢に重要な機能を有する護岸粗度の適切な評価法を見出すための基礎研究として、水路幅水深比 B/H が小さい矩形断面水路において、棧型粗度の設置条件を変化させた常流から射流までの水理実験を行い、①底面粗度と側壁粗度の抵抗特性の違いと、② B/H が小さい水路における合成粗度係数の妥当性について、水理学的な観点から考察を行った。

2. 既往研究に基づく単断面河道の合成粗度係数の算出法の不確実性と本研究のねらい

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、流下断面を各潤辺長 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。

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

この方法は、実用上取り扱いが簡便であり、また実測の結果と大きく変わらないこともあって、実務に用いられてきたものであるが、本来は、H. A. Einstein⁷⁾が流砂量の算定にあたって、側壁の影響を除去して水路底面に作用する掃流力を算定するために簡易な取り扱いを仮定したものである。

その後Lundgrenら⁸⁾によって、潤辺に沿うせん断力分布が水深に比例するとするvertical depth method、底面に垂直な2直線上に囲まれた面積に対応するとするarea method、及び底面に垂直な線上に鉛直二次元対数則が成立すると仮定するlog velocity distribution methodについて比較検討され、実用上はarea methodで十分であると、著者らの一人である藤田⁹⁾は、側岸浸食実験の際に現れた代表断面について同様の計算を行った、これらの方法に大差ないことを確認している。

しかし、これらは滑らかな横断形状を有する断面についての検討であり、足立¹⁰⁾は長方形断面の粗度が異なる

各辺の影響が鉛直・水平にそれぞれ乱流対数則分布が成立し平衡となることを条件とした数値解析により、Einsteinの直感的な仮定が実用上成立することを説明する一方、底面と側壁が受け持つせん断力の比と、 B/H によってはその仮定からのズレが生じることも予測している。

また、禰津ら¹¹⁾はレーザ流速計を用いて開水路流れの二次流の構造を詳細に計測して、 B/H が大きくなるほど側壁に作用するせん断力が底面に作用するせん断力に対して小さくなることを確認し、Froude数や B/H によらず、側壁から水深の約2.5倍程度までの領域で最大流速点のもぐり込みが生じること、すなわち、 $B/H < 5$ となる水路では流れ全体が三次元的な流況を呈することを示した。

石垣ら¹²⁾は水理実験と数値計算結果から、側壁近傍のせん断力分布が半水深程度の高さで最大となり、水面近傍と隅角部で小さくなる分布となることについて、二次流構造との対応を明らかにするとともに、 B/H が大きくなるにつれて、底面に作用するせん断力がほぼ一定値になって、側壁の影響を免れた鉛直二次元的な流れとなるのに対して、側壁に作用するせん断力は減少し、その影響範囲は有限であることを示した。

富永ら¹³⁾¹⁴⁾は、滑面のみと粗面のみで構成される長方形断面水路について水理実験を行い、二次流の構造と側壁に作用するせん断力を整理して比較し、より単断面河道に近い台形断面水路についても、側壁の勾配を変化させた水理実験を行い、二次流の構造と側壁に作用するせん断力を水理実験の流速分布から求めて長方形断面と比較しており、法勾配の効果として、側壁に作用するせん断力分布の最大値が長方形断面よりも低い位置に作用することを確認している。

これらの研究が示すように、合成粗度係数の算出方法が前提とする仮定は、側壁の粗度に対して底面の粗度が卓越する場、 B/H が大きい場においては問題を生じないと考えられるが、 B/H が小さい単断面河道においては、二次流に起因して流況が三次元的になること、潤辺を構成する粗度の配置状況、側壁の法勾配によって二次流の構造と側壁に作用するせん断力の分布が変化することが示されており、合成粗度係数が実河道の抵抗特性をどの程度表現しうるか、どの程度のズレを生じているかについては、水理学的観点からの検証が必要であろう。

そこで、本研究では、水理実験の条件をできるだけ広くとり、実測された実験粗度係数と断面分割法に基づく合成粗度係数との比較を行い、とくに B/H との関係に着目して整理を行った。

2. 実験方法と実験条件

(1) 実験水路の概要と実験ケース

底面幅20cm (アルミ製)、側壁高さ20cm (アクリル製)、水路長8mの矩形断面水路に、粗度を設置しない

ケースと、5mm, 10mm角正方形断面の亚克力棒を底面・側壁・全面にそれぞれ粗度間隔3段階で配置したケースについて、水路縦断勾配5段階(1/400~1/25)、流量10段階(4.0~18.0ℓ)の流況について、縦断水面形及び断面内流況を計測した。

実験水路の概要図と棧粗度の設置間隔の定義を図-1に、実験ケースの一覧を表-1にそれぞれ示す。

(2) 整理方法

a) 実験粗度係数*n*

粗度の抵抗特性の評価指標としては、相当砂粒粗度高さ*k_s*、抗力係数*C_D*・揚力係数*C_L*、流速係数φ(=U/U*)、Manningの粗度係数*n*等を、整理の目的に合わせて使用すべきであるが、本研究では、流速係数とManningの粗度係数を主な指標として用いる。

実験粗度係数は、上流端の三角堰計量タンクにより計測した流量*Q*と、サーボ式水位計により縦断方向1cm間隔で計測した平均水深*h*を基に、断面平均流速*U*を求めるとともに、径深*R*と各位置での全水頭から求めたエネルギー勾配*I_e*により、Manningの平均流公式に基づいて算出した。

b) 底面・側壁の粗度係数*n_i*, 補正径深*R_i*

本研究では、合成粗度係数算出の根拠となっている断面分割法を検証する観点から、一旦、それが成立しているとの立場に立ち、実験結果の整理を行う。

粗度なし(滑面)の実験ケース、全面に粗度を配置した実験ケースについては、流水断面積*A*を潤辺長*S*で除した径深*R*をそのまま用いることとし、棧型粗度を底面のみ又は側壁のみに設置したケースについては、底面の効果と側壁の効果を分離するために、断面分割法に基づいて以下の整理を行った。(1)式において、底面の値を*i*=1,

側壁の値を*i*=2で表わし、粗度を設置していない面の粗度係数に、粗度を設置しない滑面のケースの実験粗度係数(*n*=0.009~0.010)を適用すれば、粗度設置面の粗度係数のみを未知数として算出することができる。

また同様に、(2)式より各辺の潤辺長と粗度係数に応じた支配面積*A_i*、(3)式より断面分割法による補正径深*R_i*が求められる。

$$A_i = \frac{S_i n_i^{3/2}}{(S_1 n_1^{3/2} + S_2 n_2^{3/2})} A \quad (2)$$

$$R_i = \frac{A_i}{S_i} \quad (3)$$

3. 実験結果及び考察

(1) 底面棧粗度と側壁棧粗度の抵抗特性

各実験ケースの*U/U**と*B/H*の関係を、図-2に示す。

底面棧粗度は、*B/H*が大きくなるにつれ、抵抗が大きくなる傾向を示している。これは、粗度に対する相対水深が小さくなるために、抵抗が大きくなる棧粗度の特性と、滑な側壁が占める潤辺長の減少を反映したものと考えられる。

側壁棧粗度は、底面棧粗度とは反対に、*B/H*が小さくなるにつれて抵抗が大きくなる傾向を示すが、*B/H*の低下、すなわち潤辺長の増加に対する*U/U**の変化の幅は小さいこと、底面粗度と比較すると流水に対する抵抗が弱いことが確認される。

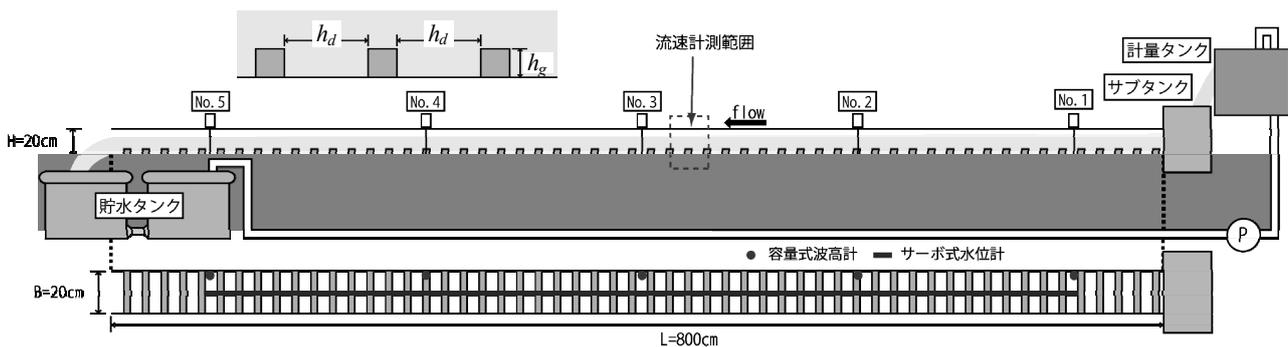


図-1 実験水路の概要と観測機器の配置, 棧粗度設置間隔の定義

表-1 実験ケース一覧とFr数, B/H, 実験粗度係数*n*の範囲

粗度条件	水路勾配 Ib[1/X]	棧粗度高さ hg[mm]	棧粗度間隔 hd[mm]	流量Q [ℓ]	Froude数		水路幅水深比B/H		実験粗度係数 <i>n</i>	
					min	max	min	max	min	max
なし(滑面)	400, 200, 25	-	-	4.0~18.0	0.66	3.07	1.8	11.6	0.009	0.010
底面のみ	400, 200, 100, 50, 25	5	45, 100, 210	4.0~18.0	0.38	1.54	1.2	6.6	0.013	0.028
		10	45, 100, 210	4.0~18.0	0.28	1.19	1.1	5.6	0.013	0.038
側壁のみ	400, 200, 100, 50, 25	5	45, 100, 210	4.0~18.0	0.32	2.50	1.1	9.9	0.011	0.023
		10	45, 100, 210	4.0~18.0	0.34	2.27	1.0	9.5	0.011	0.027
全面	400, 200, 100, 50, 25	5	45, 100, 210	4.0~18.0	0.24	1.26	1.1	6.1	0.020	0.033
		10	45, 100, 210	4.0~18.0	0.26	0.87	1.0	5.1	0.019	0.048

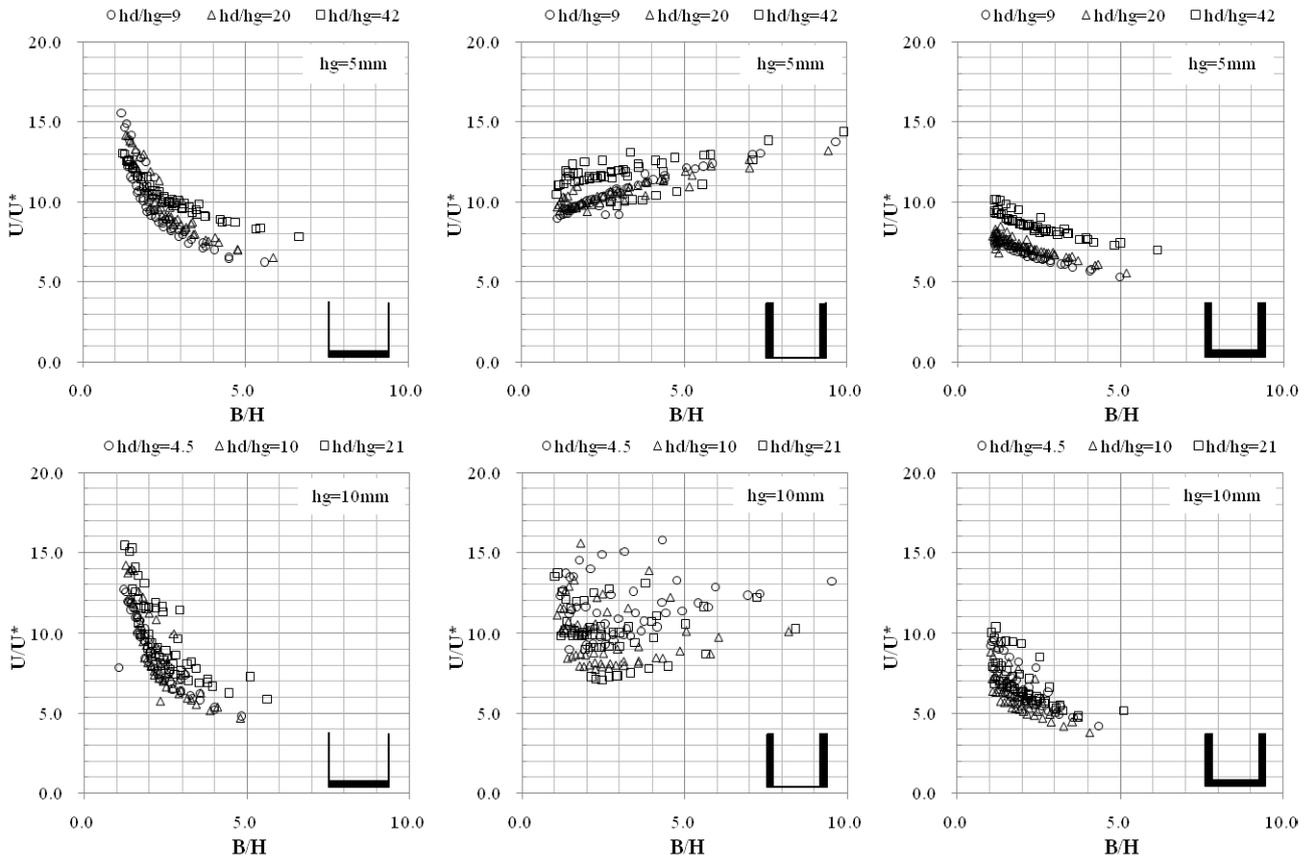


図-2 B/Hの変化に対する底面粗度、側壁粗度、全面粗度の抵抗特性

(2) 既知の抵抗特性に基づく合成粗度係数との比較

足立¹⁵⁾は、粗度による粗度係数は、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、粗型粗度の鉛直二次元対数則を(4)式にまとめている。なお、本式の適用領域は $3 \leq h_d/h_g \leq 160$ であり、式中の H は鉛直二次元流れとみなした場合の水深を示す。

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \left[\left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{h_d}{h_g} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{h_g} + 1.50 \log_{10} \frac{h_d}{h_g} - 1.91 \right] \right. \quad (4)$$

断面分割法に基づいて、(2)式より推定した粗度設置面が支配する領域において、(4)式が成立していると仮定して、(3)式による補正径深 R' を(4)式の H に代入して粗度設置面の粗度係数を算定し、全潤辺の合成粗度係数を求めて、実験粗度係数と比較した。

底面設置、側壁設置のケースに対しては、粗度設置面の補正径深 R' を(4)式に適用して粗度設置面の粗度係数を推定し、滑面には滑面の実験粗度係数を既知の値として適用し、合成粗度係数 n' を求めた。全面設置の場合は径深 R を(4)式に適用して粗度係数を求めた。

以上の方法で求めた合成粗度係数 n' と実験粗度係数 n の対応を図-3に示す。 $h_g=10\text{mm}$ の結果はばらつきが大きいことから、 $h_g=5\text{mm}$ の結果に着目して考察する。

底面粗度については、 n が大きい領域では、合成粗度係数と実験粗度係数がよく一致するが、 n が小さい領域

でのばらつきが大きく、合成粗度係数に対して $\pm 10\%$ 程度の差を生じている。 n が小さい領域とは、 B/H が小さい領域に相当し、 B/H が小さくなるにつれて、差が顕著になっている。したがって、このズレは側壁の影響を受けた断面効果と考えられる。

側壁粗度では、実験粗度係数が合成粗度係数を全体的に下回り、とくに n が小さくなるにつれて、実験粗度係数が合成粗度係数を下回る度合いが大きくなっていく。 B/H に着目すれば、 B/H が大きくなるにつれて、差が拡大することが確認される。

すなわち、側壁に配置した粗度の抵抗効果は、断面分割法により期待される程は作用しないことを示している。

(3) 断面内の流速分布に基づく考察

$h_g=5\text{mm}$, $h_d=45\text{mm}$, $Q=18.0\ell$ のケースについて、水路中央区間の2本の粗度間隔の断面流速分布の主流速成分について、流下方向に断面間隔5mmで計測し、断面内各計測点の平均流速の計測値を流下方向に平均した断面流速分布を図-4に示す。

底面のみに粗度を配置したケースでは、最大流速点のもぐりこみが確認され、 B/H が大きいケースには、側壁の影響がより顕著に表れている。

側壁のみに粗度を配置したケースでは、側壁近傍の流速は低減されているが、その影響範囲は限定的であり、断面の高さ方向・横断方向に広く流速の大きい領域が広がっている。

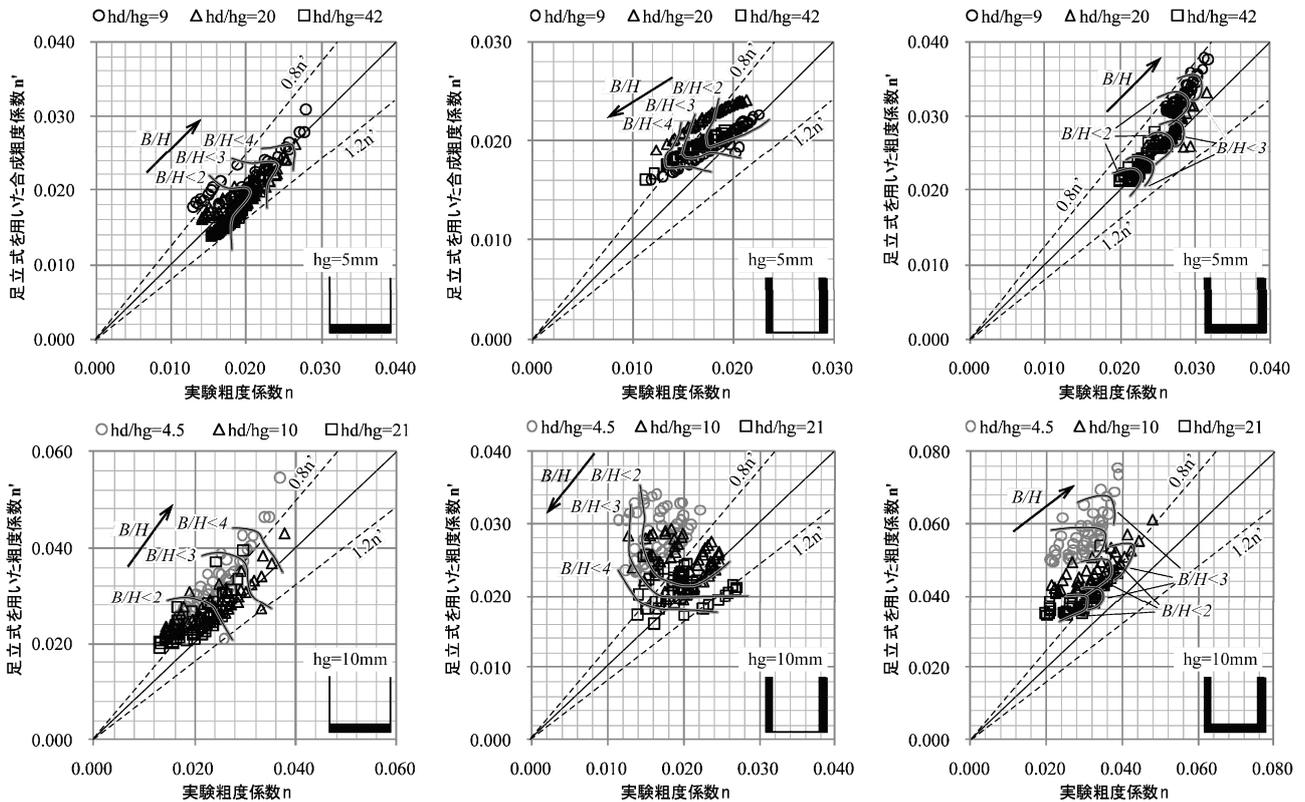


図-3 実験粗度係数 n と断面分割法に槽粗度の鉛直二次元抵抗則を適用した合成粗度係数 n' の比較

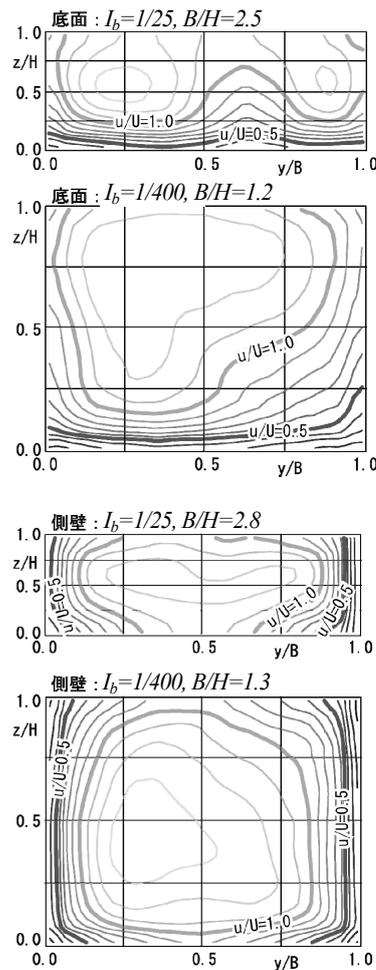


図-4 平均化した断面流速分布の比較

以上のように、壁面粗度の流水抵抗効果は底面粗度の効果と比較すると弱いことを示したが、既往の研究も踏まえてこの原因を考察すれば、その原因は、開水路流れの基本である、重力の流下方向成分の分配のされ方にあると考えられる。底面には常に鉛直方向に作用する重力の大半を示すその垂直成分が作用しており、路床底面や粗度要素にはその平行成分、すなわち重力の流下方向成分が必ず作用していることとなる。幅が無限大の場合にはその釣り合いで流れの状態は決定され、等流であれば、乱れによる混合、すなわちレイノルズ応力とせん断応力分布の釣り合いから対数則分布となる。これに対して、有限幅の場合には、重力の流下方向成分の一部が側壁に働く流体力として負担されることとなるが、側壁に作用するせん断力は、流水の運動量を壁面に伝える乱流混合と二次流との作用に対する反力として定まるので、底面のように一様に近い分布とはならない。

これらのことから、各潤辺のManningの粗度係数から断面を分割して合成粗度係数を算出する方法は、側壁が垂直に近くなるほど、実際の粗度係数との差を生じやすいと推察され、また、側壁が潤辺に占める割合が高い単断面水路において、よりそれが顕著になると考えられる。

4. 結論と課題

以下に、本研究の結論を示す。

- (1)粗度が底面だけのケースでは、相対水深により抵抗が変化する既知の特性通りの傾向が確認されたが、水

路幅水深比 B/H が小さい領域では、合成粗度係数と実験粗度係数の差が、断面効果により拡大する。

- (2) 底面・側壁・全面に粗度を配置したケースの比較から、側壁の粗度は底面の粗度に比して流れに対する抵抗が小さいことを確認した。
- (3) 断面内流況の計測結果を併せた検討により、側壁に配置した粗度の抵抗の効果は、側壁近傍に限定されており、断面分割法に基づく合成粗度係数を適用した場合、側壁の粗度が大きめに評価される。

また、これらの結論と既往の研究結果を踏まえ、中小急流河川の河道計画における粗度係数の取り扱いについて考察する。

護岸の力学設計法改訂以前の単断面河道の河道計画では、一定以上の流下能力を確保する観点から、計画粗度として実河道の有する粗度係数より大きめの値が用いられることが一般的であり、流下能力は担保されるが、改修後の出水時に河床面に作用する掃流力は増大して、河床低下による河道災害の一因になったと考えられる。

改訂版では、単断面河道の粗度を合成粗度係数により評価することを位置つけた結果、自然河道に比して滑な護岸の粗度が考慮されることによって、出水時の流況についてより現実的な評価が可能となったと考えられるが、同改訂版に追記された「護岸には適切な粗度を設けること」については、護岸の近傍の流速を低下させる効果は期待できるが、河道全体の粗度係数を大きく変化させるほどの効果は期待できないことに留意するべきである。

視点を変えれば、護岸近傍の流速を低減させるような粗度要素を設けても、側壁の粗度の効果は領域限定的であり、河道の流下能力が大きく損なわれることはないともいえる。しかしながら、護岸の粗度を大きくした際の定量的な評価方法については今後の課題と考えられる。

また、本研究で確認された合成粗度係数と実際の粗度係数のズレが実河道で生じた場合、とくに合成粗度係数を高めに見積った場合には、出水時の流速が計画より増加し、河道の安定を損なう要因となる。さらに、底面の粗度に対して側壁の粗度の効果が相対的に弱いことから、せん断力の多くを河床面が受け持つこととなり、これも掃流力増大の要因と考えられる。

最後に、本研究の課題を示す。本研究の水理実験は、矩形断面に棧型粗度を適用したものであり、側壁の法勾配の効果を検討する必要がある。また、粗度要素についても、より実河道に近いものに近づけていくことが必要と考えている。

今後も検討を続け、中小急流河川の河道計画・護岸設計実務に資する研究としていきたい。

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と、水理実験に粘り強く取り組んでいただいた研究室の学生である松岡俊一郎氏に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準，2008.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 原田守啓，藤田裕一郎：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，水工学論文集，第54巻，pp. 1009-1014，2010.
- 7) Einstein, H. A. : Formulas for Bed-Load Transportation, Trans. ASCE, vol. 107, pp. 575-577, 1942.
- 8) Lundgren, H. and Jonsson, I. G. : Shear and Velocity Distributions in Shallow Channels Proc. ASCE, vol. 90, HY1, 1964.
- 9) 藤田裕一郎：直線流路の側岸侵食機構，京都大学防災研究所年報，第22号B-2，pp. 537-552, 1979.
- 10) 足立昭平：長方形断面水路の側壁効果に関する研究，土木学会論文集，第81号，pp. 17-26, 1962.
- 11) 禰津家久，中川博次：開水路流れの三次元乱流構造（縦渦）とそれに及ぼす自由水面の影響，京都大学防災研究所年報，第28号B-2，pp. 499-522, 1985.
- 12) 石垣泰輔，今本博健，塩野耕二：開水路側壁近傍の壁面せん断力分布と流れの三次元構造について，水工学論文集，第39巻，pp. 711-766，1995.
- 13) 富永晃宏，江崎一博：開水路流の三次元乱流構造に及ぼす側壁および境界粗度の効果，第29回水理講演会論文集，pp. 827-832, 1985.
- 14) 富永晃宏，江崎一博，禰津家久：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.
- 15) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，第104号，pp. 33-44, 1964.

(2010. 4. 8受付)