

河川護岸の設計に関する基礎的研究

Fundamental Study for the Design of Revetment

仲村 学*・高松 諭*・福井吉孝**・吉川秀夫***

By Manabu NAKAMURA, Satoshi TAKAMATSU, Yoshitaka FUKUI and Hideo KIKKAWA

Revetments are constructed to reduce erosion of river banks, but it is very difficult to design hydraulically. In this paper, hydraulic properties are investigated experimentally. As the result, squared bars which are used for the roughness of river banks will prevent the erosion at the concave side and will cancel the circulation in sinuous rivers.

Keywords : squared bar roughness, secondary flow, circulation

1. はじめに

護岸は、流水の勢いを弱め、河岸あるいは堤体本体を保護するものである。流勢をそぐためには護岸の粗度を大きくする、すなわち抗力を大きくすることが有効である。しかし、護岸はその構造上、根元は水流にさらされている。水路が移動床で、もし保護対策が施されていないならば、時の経過とともに根元の土砂が洗い流されてしまい、護岸は正に足元から危なくなる。

水路と護岸のすり付け部、すなわち水路側岸部での洗掘現象に対して、発生メカニズム、対策など多くの研究がなされてきており、水路中央部に向かう二次流によって、洗掘を生じていることが判明している。従って、護岸そのものに強度を持たせるとともに、洗掘の原因となる流心部に向かう二次流を如何に抑えるかが設計上非常に重要な問題となる。

本研究では、大きな抗力を生じさせるために護岸の側壁に棧を取り付け、棧粗度とし、その棧に働く抗力を測定するとともに二次流の速度、向き、乱れ等の水理量を測定している。側壁が直立の場合、傾斜してい

* 学生員 早稲田大学大学院 理工学研究科修士課程建設工学専攻

(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科(〒350 埼玉県川越市鯨井中野台2100)

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

る場合、また、棧粗度が単一の場合、連続的に多数取り付け付けた場合での流況を測定し、諸水理量の比較検討を行った。

2. 実験概要

長方形断面に関する実験は、図-1のような長さ15m、幅93cmの木製水路を用い、また、台形断面に関する実験は図-2に示すような長さ9m、底面幅40cm、斜面の傾き角度を45度とした水路を用いた。長方形断面水路の一方の側壁及び台形断面水路の斜面には3cm四方の棧粗度を間隔30cmで上流端から下流端全てにわたり付設した。

Case 1、4は棧粗度を流れに対して直角($\alpha = 0$ 度)に、Case 2、3及び5は図-1、2のように棧の上部を $\alpha = 30$ 度だけ傾けた。流速等は、2チャンネル熱膜流速計を用いて測定し、100Hzで2048個のサンプリングを行った。一方、圧力は棧に直径1mmの孔を開け、その部分が棧傾斜方向にスライドするようにした圧力測定用の棧¹⁾を作成して測定した。この棧の向きを上流側、水路中央側、下流側の3方向に変え水路中央に設置したピトー管の静圧管との差圧を微差圧計を用いて測定した。流速分布等は、流速を棧と平行な断面で測定し、それを主流の方向に投影したものを示した。なお、実験条件は表-1に示すとおりである。

また、一様流速中に置かれた棧の流れに対する角度 α と抗力の大きさとの関係を得るため、台形断面水路の上流端において棧粗度を一つだけ取り付け、 α を0度、15度、30度、45度に変化させ、圧力を測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 平均流速分布

棧粗度を流れに対して直角($\alpha = 0$ 度)に付設された場合(直角配置)の主流速分布を図-3に示す。長方形断面、台形断面ともに、粗度のある側の壁面(粗面)近傍では、流速は4割程度減速され、流速の等値線は粗面とほぼ平行になっている。最大流速域は、長方形断面では中央より滑面側の8割水深付近に、台形断面では、水面付近に現れる。また、棧粗度の根元を洗掘するような二次流は依然として存在するが、断面内の渦度 ω_x もほとんど断面内全体で0前後の値をとり、断面

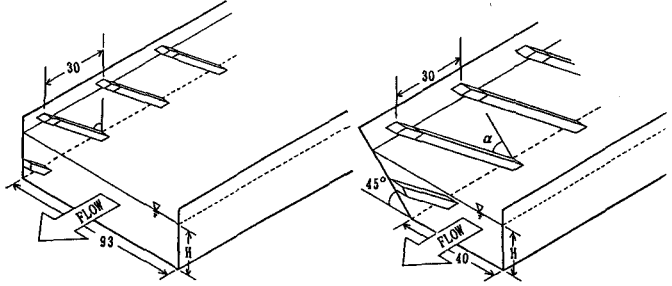


図-1 長方形断面 [cm]

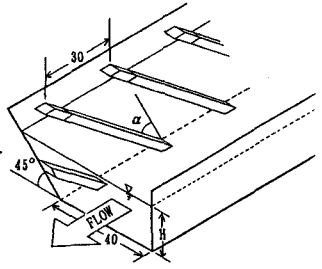
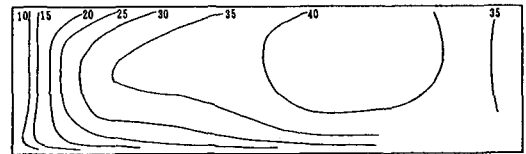


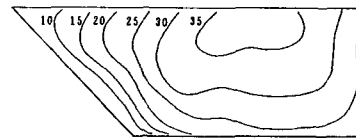
図-2 台形断面 [cm]

表-1 実験条件

Case	Q [l/s]	H [cm]	U _{max} [cm/s]	α [deg]	断面形状
1	78	26.6	41.5	0	長方形
2	78	26.6	42.0	30	長方形
3	76	21.2	53.2	30	長方形
4	30	22.0	37.0	0	台形
5	30	22.2	36.5	30	台形

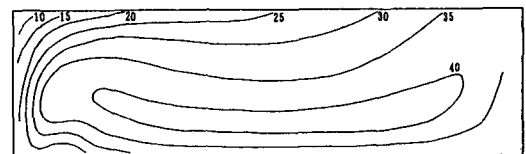


(a) Case 1



(b) Case 4

図-3 平均流速分布 ($\alpha = 0$ 度) [cm/s]



(a) Case 2

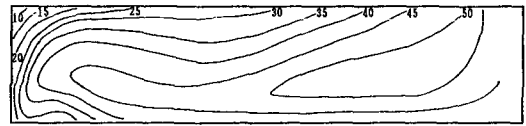
図-4 平均流速分布 ($\alpha = 30$ 度) [cm/s] (その1)

内全体での Circulation もほとんど 0 で、全体としての循環は生じていない。

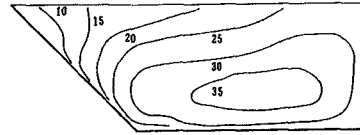
棧粗度の上部を下流側に傾けて付設した(斜め配置: $\alpha = 30^\circ$) 場合の平均流速分布を図-4、二次流を図-5に示す。二次流は水面では粗面より離れるように、底面では粗面側に向かって流れている。直角配置の Case 1、4と比較すると水面付近は減速域となり、一方、底面近傍は加速域となっている。このため、粗面と底面との接合部での流速は棧粗度の直角配置の場合と比較して加速されている。台形断面は長方形断面に比べ、接合部での自由度が大きいためその影響が顕著に現れている。

しかし、斜め配置においては、棧粗度根元部の影響と考えられる局所的な主流速の減少領域が、明確に現れるようになる。長方形断面については Case 2、3の2つについて実験をおこなったが、付近の流速がほぼ等しいため、この影響の範囲はほぼ同じである。

また、それぞれの Case の水深方向平均流速を比較すると、棧粗度の斜め配置は直角配置の場合よりも横断方向の主流速分布が一様化されているといえ、棧粗度の支配領域に関しても、鉛直の場合の粗度高さの 6~7 倍から 3 倍程度に小さくなっている。したがって、主流速の減速効果と

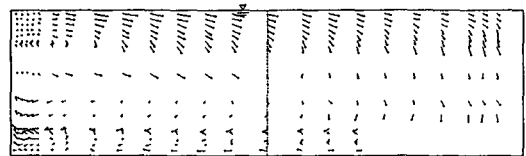


(b) Case 3

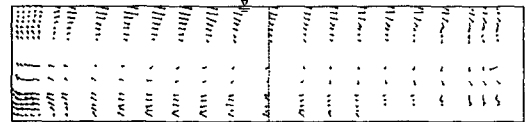


(c) Case 5

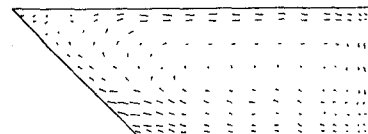
図-4 平均流速分布 ($\alpha = 30^\circ$) [cm/s] (その2)



(a) Case 2

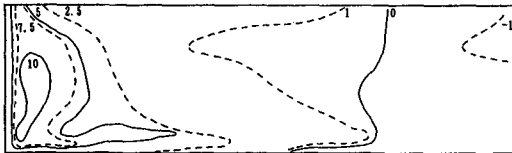


(b) Case 3

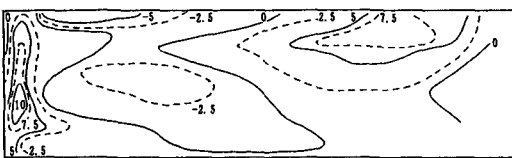


(c) Case 5

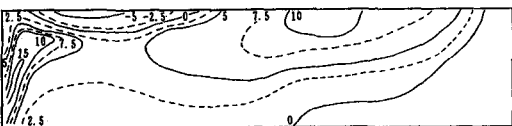
図-5 二次流ベクトル



(a) Case 1



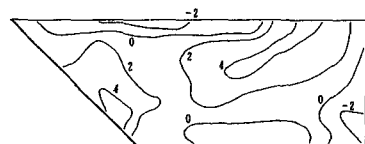
(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5

図-6 レイノルズ応力 $-u'v'$ [cm²/s²]

いう点で見ると棧粗度の斜め配置は直角配置に比して効果は期待できない。

3・2 レイノルズ応力

図-6にレイノルズ応力 $-u'v'$ の分布を示す。粗度の斜め配置は直角配置の場合と比較し、粗面近傍の大きな乱れが、水面付近で水路中央側へ輸送されている傾向がみられる。これは大きな二次流が生じたことによるものと考えられる。さらに水面ごく近傍においては、粗度高さの3倍から5倍の付近で負の値を示す領域がある。これは、水面付近での減速効果の影響である。

図-7に $-u'w'$ を示す。斜め配置された場合は、最大主流速が底面付近に移るため、負のせん断力の領域が大きくなっている。

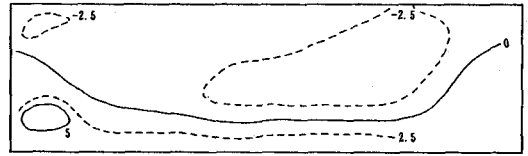
3・3 棧粗度に働く力

棧粗度に働く単位長さあたりの力の鉛直方向分布を図-8、9に示す。長方形断面のCase 1は棧粗度を流れに対して直角($\alpha = 0$ 度)に付設した場合であるが、このときは底面付近がやや小さくなっている部分を除いては、ほぼ様な分布になっている。これは主流速分布ともよく対応していることがわかる。一方、Case 2及び3は棧が斜めに配置されたものであり、底面付近において抗力が大きく、水面に近づくにつれて小さくなり、水面付近で再び大きくなる傾向が共通して表れている。また、台形断面に $\alpha = 0$ 度で付設された棧粗度の場合(Case 4)では、水面から底面まで直線的に増加している。棧粗度を付けた場合(Case 5)、底面で抗力が大きく水面に近づくにつれて小さくなり、水面近傍で再び大きくなっている。この傾向は長方形断面に比べより顕著に現れている。これは粗面が傾いているため、棧粗度上下流面での水面の影響を直接受けるからである。

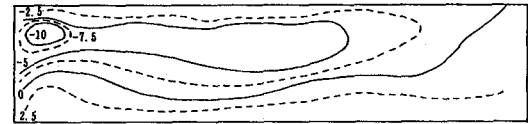
これらの抗力の平方根と鉛直方向の主流速分布形状とは必ずしも一致しない。また、棧粗度の上流面の圧力も、単位高さあたりの抗力とほぼ同様の分布形状を示しているが、この圧力差により二次流が生じるものと考えてよい。

3・4 底面せん断力

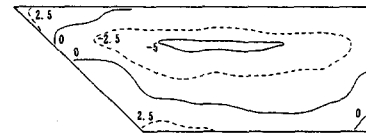
図-10にCase 2の底面せん断応力流れ方向平均値の横断方向分布を示す。直角配置の場合は側壁から離れるにつれて大きくなっているが、



(a) Case 2



(b) Case 3



(c) Case 5

図-7 レイノルズ応力 $-u'w'$ [cm^2/s^2]

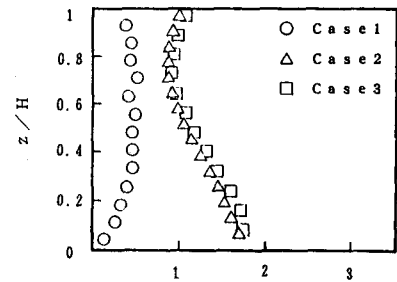


図-8 単位長さあたりの抗力 d [gf/cm]
単位長さあたりの抗力 d (長方形断面)

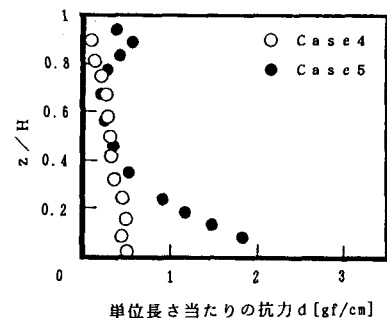


図-9 単位長さあたりの抗力 d (台形断面)

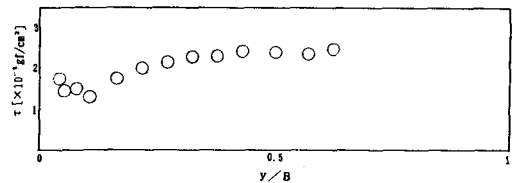


図-10 底面せん断力 (Case 2)

斜め配置の場合は、まず側壁近傍で大きな値をとってからいったん小さくなり、再び水路中央に近づくにつれて大きくなる。また、底面せん断力全体の値も直角配置に比べ大きくなっている。

3・5 栈粗度の傾き角度と抗力の関係

一様流速中に置かれた栈に働く力（抗力 D ）について考える。栈に対して直角方向の主流速成分は $U \cos \alpha$ であるから抗力 D は、

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho L k U^2 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

と定義することができる。ここに、 C_D ：抗力係数、 L ：栈粗度の長さ、 k ：栈粗度の高さである。 $L = H / \cos \alpha$ より、

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho H k U^2 \cos \alpha = D_0 \cos \alpha \quad (2)$$

となる。ここに、 D_0 ： $\alpha = 0$ 度の抗力である。この力の流れ方向の成分を D_x 、流れに垂直な面内の成分を D_z とすると、

$$D_x = D \cos \alpha = \frac{1}{2} C_D \rho L k U^2 \cos^3 \alpha \quad (3)$$

$$D_z = D \sin \alpha = \frac{1}{2} C_D \rho L k U^2 \cos \alpha \sin \alpha \quad (4)$$

である。 D_z は二次流を発生させる力である。

台形水路の上流端に単一栈粗度を置いた場合の角度 α と抗力 D の関係を図-12に示す。実験結果と式(2)は良く一致している。

抗力係数をこのように定義すれば、栈粗度の角度と無関係に抗力係数を定めることができる。

3・6 抗力係数と代表流速について

粗度を付設した水路における粗面のせん断力の算定に際しては、抗力の評価が重要な問題となる。式(1)の抗力の算定式において、抗力係数 C_D と代表流速として用いられるべき流速が決定すれば抗力の大きさは容易に求めることができるようになる。本実験の5つのCaseに共通する C_D を決定すると、代表流速としては栈粗度高さの1.1倍のところの水深平均流速、その時の C_D の値はおよそ1.6であるとして抗力の大きさを概算することができる。

図-13に5つのCaseにおける抗力の実測

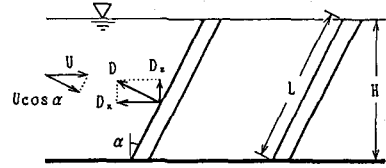
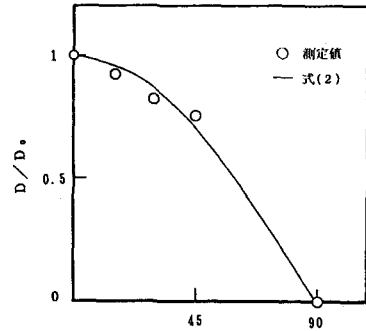


図-11 抗力説明図



栈粗度の傾き角度 α [deg]

図-12 栈の傾き角度と抗力の関係図

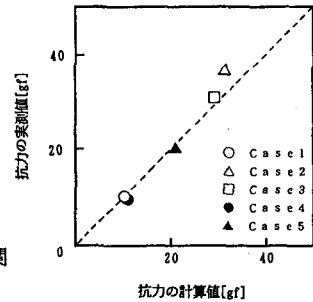
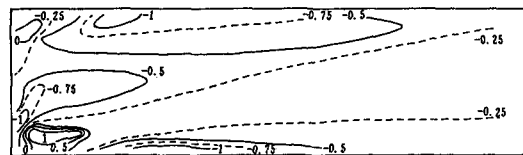
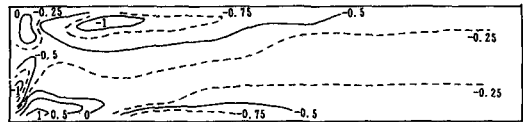


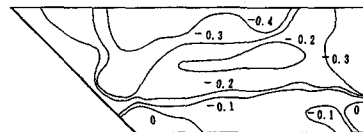
図-13 抗力の実測値と計算値との比較



(a) Case 2



(b) Case 3



(c) Case 5

図-14 渦度 ω_x [1/s]

値とこの方法により算出された値との比較を示した。

3・7 断面内渦度と循環

断面内での渦度 ω_x の分布を知ることは循環を配分する際に必要である。

直角配置における断面内の渦度 ω_x は、断面全体にわたりほとんど0前後の値を示している。一方、斜め配置の渦度を図-14に示すがこの場合は、断面内の一部の領域（主流速の局所的減少領域）を除いては負の値を示す。特に、栈粗度近傍の3割水深のところで最も大きな値を示しているが、これは、栈粗度根元部の比較的大きな抗力によって生じたと考えられる二次流の影響によるものである。また、粗面側の水面、底面付近においても、大きな値を示している。一方、滑面側においては0に近くなり、渦度の、栈粗度の斜め配置による影響は無いものと思われる。

図-15に抗力の鉛直方向成分と循環の大きさととの関係を示す。この図には本実験で行った長方形断面、台形断面の全てのCaseについて示したが、断面形状にかかわらず比例関係のような、ある一つの関係があると考えられる。この抗力と循環の関係及び渦度の分布より護岸設計に必要な底面での二次流を算定することができる。

4. おわりに

以上のように、栈粗度の配置方法と流速、抗力、循環等との関係をみてきたが、栈粗度の斜め配置が、おおよそ水路湾曲部外縁部の洗掘防止に有用であるといえることがわかった。また、栈は蛇籠あるいはそれに相当するもので実用的には十分施工できるものである。ただし、栈前後の流れによる洗掘には十分に注意する必要がある、これを防ぐための工法がジオテキスタイル等で可能であることが一方では検討されている。

しかし、抗力係数、代表流速の妥当性や、抗力と循環及び二次流の大きさととの関係は、今後広い範囲にわたり実験していく必要があると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、早稲田大学学生の栗井誠司君、井田泰蔵君、菊山朋彦君、前田高秀君ならびに同大学流体実験管理室の諸氏の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村賢二・金子 功・吉川秀夫：護岸の栈粗度に関する実験的研究、水工学論文集、第34巻、pp.469～473. 1990.

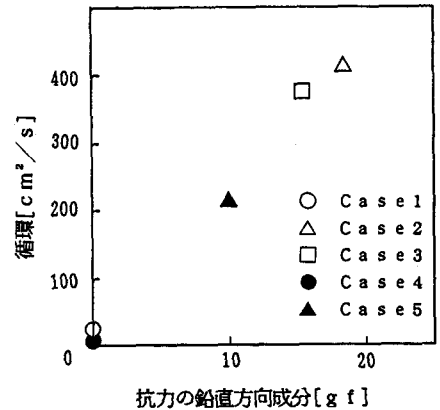


図-15 抗力と循環の関係