

多自然型護岸周辺の流れ特性に関する実験

Experiments on Flow Characteristics around
Rich-in-Nature Type of Revetments

藤田裕一郎* 澤井 健二** 神田 佳一***

By Yuichiro FUJITA, Kenji SAWAI and Keiichi KANDA

Recent river channel improvement projects in Japan are almost occupied by rich-in-nature river works. River engineers are compelled to be conscious to nature in and of rivers. However, philosophy of nature concerning to river has not been discussed before the rich-in-nature improvement project and fundamental functions of such works have not been studied as well. In this study, rich-in-nature types of revetment were discussed and hydraulic model tests were carried out to investigate flow characteristics and hydraulic functions of a step type of revetments. Secondary currents as observed in channels with compound cross sections appeared in each step. Toe protection with boulders showed a great effect of velocity reduction.

*Keywords: flow characteristics, revetments, rich-in-nature river works,
hydraulic experiments, open channel flow*

1. はしがき

最近の河川改修は多自然型川づくり¹⁻⁶⁾といってよいほど、全国各地で自然を意識した河川工事が進められ、現在種々の工法が実地に検討されている。しかしながら、本来第一に議論されておかれるべき筈の河川・河道の「自然性」については、その認識を深める時間的余裕のないまま、事業のみを進展させていかねばならないという状況にあることは否めない。このため、現行の工事はパイロット事業と位置づけられ、多様な工種を適用する模索状態が続いている。

河川・河道の持つ「自然性」は、明治以降の近代河川工法の展開によってかなりの変貌をみたとはいえ、洪水・渇水に対する人間活動の長い歴史の中で培われてきたものであって、流域毎に、また、河道区間毎に異なった、本来、河川の個性ともいえるものである。したがって、多自然型河川工法は、流域や実施区間近辺の自然とともに歴史的・社会的環境に配慮して計画実施していくことが求められている。とくに、護岸は施工個所が多く、かつ施工延長も長いだけに、河川環境に与える影響が大きく、河川景観の最大の支配要因

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部

(〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 摂南大学教授 工学部

(〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

*** 正会員 工修 明石工業高等専門学校講師

(〒674 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

の一つともなっている。同時に、洪水時の安全を考えると、河岸を保護し、河道の安定を図るという本来の目的も疎かにできない。こうした観点から、多自然型護岸に関連する問題点とその対策を見出ししていくために、著者らは、多自然型護岸の構造的な特徴を従来型のものと比較・検討し、それらの適用性を評価することを目的として、その水理機能－環境・防災機能－に関する実験的な検討に着手している。

実際に施工されつつある多自然型護岸は、河川の規模、周囲の環境などが多岐に亘るために、工法の種類、形状は様々である。そのうちには、確かに周辺環境にかなりの配慮を払っているが、多自然型と呼ぶには相応しくないと感じられるものも混じっている。このように、現段階では多自然という言葉の示す内容も明確にはなっておらず、これは、実験対象を絞り込んでいくことに関連して問題となった。そこで、ここでは取りあえず、抽象的で具体的な程度に差はあるが、「多自然型川づくりの基本理念に基づいて努力がなされている護岸」⁵⁾を多自然型護岸と見なし、実験対象を限定した。

以上より、本文では、初めに、多自然型護岸の構造についてそれらの特徴を述べ、実験対象を明確にした後、代表的な構造の護岸模型を用いて行った基礎実験とその結果を述べる。

2. 多自然型護岸の構造と実験対象

多自然型の河川改修では、着手以前に生態系について何等かの調査が行われていて、それを維持しようとする人工的な疑似自然の創出に努力が払われている。そのために、改修には天然素材が多用され、ある場合には素材自体が柔らかく、多孔性に屈撓・柔軟性に富んだ構造とされている。護岸の改修の場合にも、河道には景観上や生物環境としての多様性がもたらされるよう配慮されている。

これらの多自然型護岸の構造の主なものを分類すると、コンクリートブロックを自然石に換えた練積み・空積み護岸、コンクリート型枠内に栗石を詰めたり、芝を張ったもの、それらと柳枝工を併用したもの、木工沈床や柵工を河岸上部にまで適用したもの、河岸を蛇籠・布団籠で覆ったもの、詰め杭と栗石を併用したもの、張り芝のみのもの、ようになる。これらの主体は昭和30年代まで一般に用いられ、その後コンクリートブロック護岸に置き換えられてきた工法であって、それらを適用しようとするれば、強度を再評価した上で、場所を選んで施工していかなければならない。しかし、現在では事業を先行させるために、強度・耐久性といった問題に立ち入らないで、穏やかな流況の直線的な河道や河岸凹部のような大きい外力が働かない河岸を選んで適用されている。いずれにせよ、適用に当たっては、こうした工法⁷⁾とコンクリートブロック工法の特徴をしっかりと把握し、種々の機会を捉えて多自然型川づくりに用いられる個々の護岸工に関して、施工後の継続調査とともに、水理学的な実験と解析に基づいて、その強度を定量的に評価する努力が不可欠である。

外見的に従来の護岸と類似の多自然型護岸工については、既往の水理学研究の成果が適用できるものと考えられ、また、コンクリートや鋼線で結合されている護岸は、小スケールの実験では最終的に強度を評価することは困難であると判断される。そこで、本研究では、従来研究がほとんど行われていない形状で、強度が比較的低いと思われる、多自然型護岸工の典型例を対象とした。すなわち、図1のような詰め杭による0.6mの段差と栗石覆い工を持つ、平均法勾配5割の5段階構造の階段状護岸周辺の流れ特性を把握する実験から着手することとした。この護岸工の全幅は、根固め捨て石を含めると約20mであって、かなり大きな緩流河川の低水護岸と考えられる。

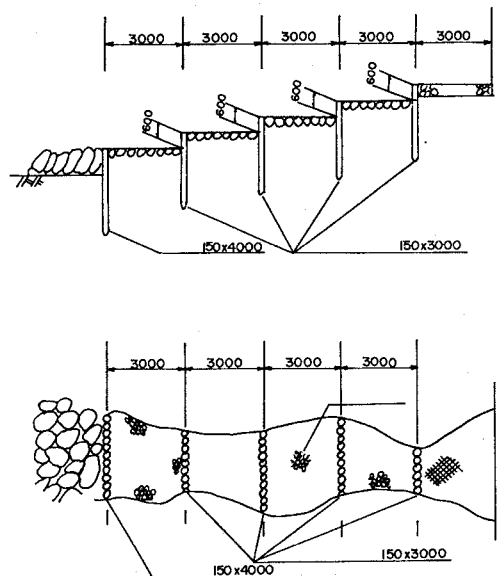


図1 実験対象とした護岸の模式図(単位: mm)

3. 階段状多自然型護岸周辺の流れ特性に関する実験

3. 1 実験の概要

実験は、対象とした護岸の基本的な水理特性を求めるために、2つの直線水路において、スケールを若干変えた2模型を用いたA及びBの2シリーズを並行して行い、さらに、弯曲流れの影響を把握するために、曲線流路を用いた実験（Cシリーズ）も試みた。

直線流路における実験は、A、B両シリーズとも護岸近傍のみを対象として、Aシリーズでは、図2のような幅1.0m、深さ0.3m、長さ10.8mの実験区間を有し、片側側壁がアクリル板で作られた可変勾配の木製水路Aを用い、Bシリーズでは、図3のような幅1.8m、深さ0.4m、長さ15mの実験区間とその上・下流区間に幅0.5m、深さ0.75mの流入・流出部をもつ可変勾配の鋼製水路Bにおいて行った。

Aシリーズの実験では、路床に粒径1.8mmの粗砂を敷き、水路中央8.2mの区間左側壁側に、詰め杭を直径5mmの丸鋼棒で、法覆い工の栗石を粒径7.6mmの礫で模した段差2cm5段の護岸模型（縮尺約1/30）を図4のように設置し、護岸最下段の詰め杭前面には、根固め捨て石の模型として粒径26mmの玉石を幅約10cmで敷き詰めた。これまでに、表1に示す4実験を行っており、いずれの実験でも、水路下流端に設置した傾斜型水位調節堰によって実験区間を等流状態に保った後に水位及び路床高を測定した。また、Run 1及びRun 2では、実験区間の上流から5mの断面において流速分布を詳細に計測し、出力電圧をAD変換ボードを経由してパソコンに取り込み、直ちに統計処理を行った。このときのサンプリング周波数は100Hz、データ数は4096であった。

Bシリーズの実験⁸⁾に用いた護岸模型は、縮尺約1/20であって、図5のような詰め杭を10mmの鋼棒で模擬した詳細模型と、12mm厚さの合板で置き換えた簡易模型をともに6m長分用意した。図3のように、この実験区間に、上流から整流部2m、簡易模型区間3.6m、詳細模型区間6m、簡易模型区間2.4m、堰上げ区間1mを設定した。Run 1、2では路床に6.5cm厚さで平均粒径1.42mmのほぼ一様な粗砂を敷き詰め、護岸模型部にも同じ砂を充填した。Run 3、4では栗石による覆い工と根固

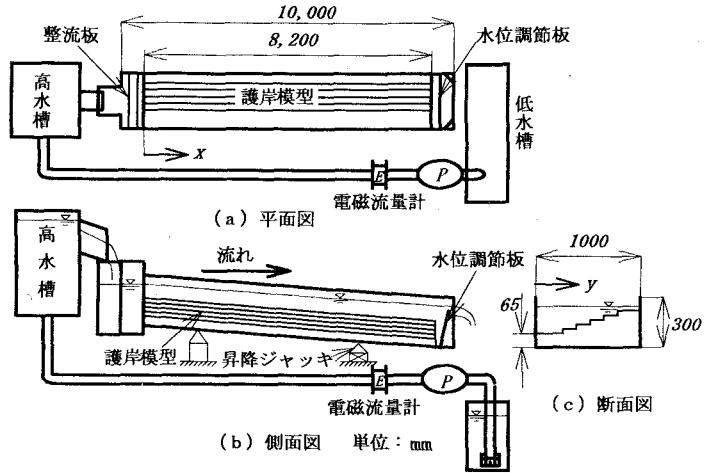


図2 Aシリーズの実験に用いた水路

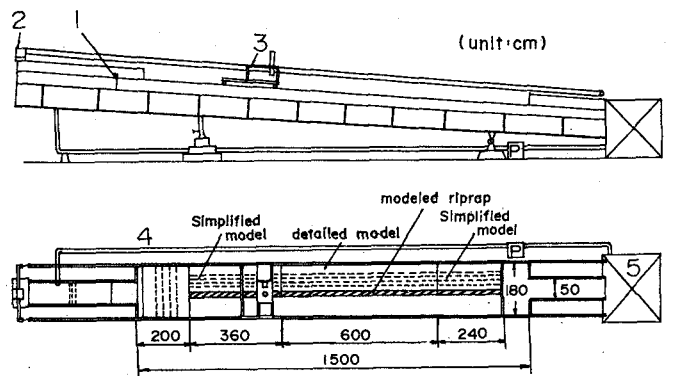


図3 Bシリーズの実験に用いた水路

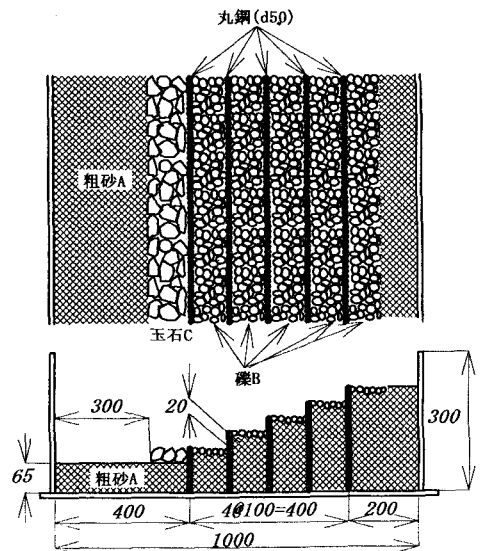


図4 Aシリーズの護岸模型(単位: mm)

め捨て石をそれぞれ直径約10mmの礫と
同約50mmの丸石を配置して模擬した。
測定は、通水前後に路床高及び水位を、
また通水中に流速分布を詳細模型区間
の1断面で行った。水位・流速の計測
値はやはりパソコンに取り込み、プロ
ペラ流速計の高さはパルスモータをパ
ソコン制御して自動設定した。1/2000
の路床勾配に対して、護岸模型の天端
を越える水位、及び半ばが浸る程度の
水位とするために、通水流量はRun 2、
3では351/s、Run 1では551/s、Run
4では701/sに設定した。

表1 Aシリーズの実験条件

実験番号	河床勾配 i	流量 $Q(l/s)$	断面流速 $U_m(cm/s)$	等流水深 $h_0(cm)$	摩擦速度 $U_{*h}(cm/s)$	摩擦速度 $U_{*R}(cm/s)$	フルー ド数 F_r	粗度係数 n
Run 1	1/500	10.4	32.4	6.5	3.6	2.8	0.4	0.015
Run 2	1/500	22.4	39.5	9.6	4.3	3.4	0.4	0.016
Run 3	1/500	60.2	51.4	15.9	5.6	4.2	0.4	0.018
Run 4	1/200	60.2	71.7	12.6	7.9	5.9	0.7	0.018

$$U_{*h} = \sqrt{gh_b j} \quad , \quad U_{*R} = \sqrt{gR_b j}$$

表2 Bシリーズの実験条件

実験 番号	河床勾配 i	流量 $Q(l/s)$	断面流速 $U_m(cm/s)$	水温 $t(^{\circ}C)$
Run 1	1/2000	54.7~58.1	27.6	9.0~11.0
Run 2	1/2000	33.1~34.1	30.0	11.0~12.0
Run 3	1/2000	30.8~34.1	28.5	7.1~9.0
Run 4	1/2000	68.8~70.6	25.4	10.5~12.8

表3 Cシリーズの実験条件

実験 番号	河床 勾配 i	流量 $Q(l/s)$
Run 1	1/100	3.0
Run 2	1/100	13.0
Run 3	1/100	40.0

つぎに、Cシリーズの実験では、幅
3m、深さ0.2m、長さ15m、勾配1/100のコンク
リートモルタル製水路の内部に、ブロックと
煉瓦を組み合わせて、図6のような流路幅1.
6m、波長5m、最大偏角30度の複断面蛇行流路
を約2波長分作成した。ただし、上下流には
整流と水位制御のために若干の直線部を設け
ている。流路横断面形状は、図6に示したよ
うに、幅0.5mの低水路床部の両側に
段差1cm5段の階段状護岸が幅0.25m
で沿わされており、その外側に約0.
3mの高水敷が続き、その5cm上方が河岸
天端となっている。路床には粒径
1.5mmの粗砂を敷均しているが、蛇行
流路の場合は全断面を模擬する必要
があるために、護岸模型の縮尺が約
1/60と小さくなり、詰め杭と法覆い
工の完全な模型を作成することが困
難となった。そこで、これらに相当
する部分を金網で作成した籠に粒径

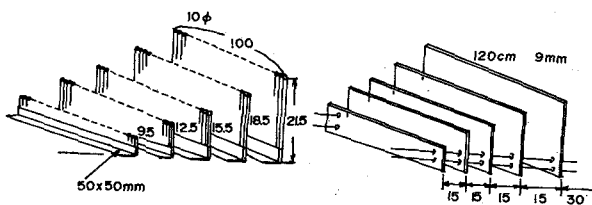


図5 Bシリーズの護岸模型(非記入の単位: cm)

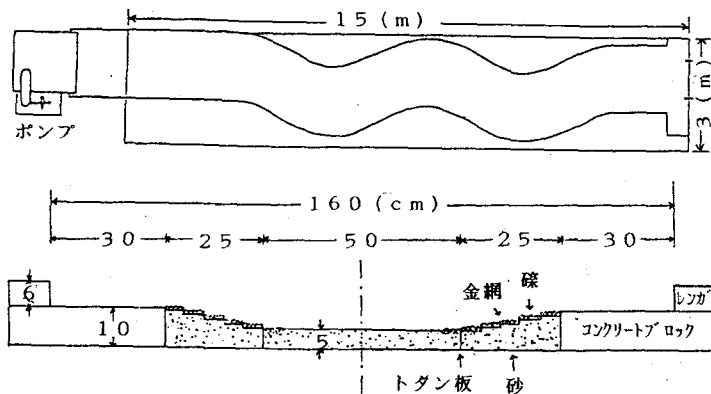


図6 Cシリーズの実験に用いた水路

10~20mmの礫を1層程度敷き並べて模擬し、それによって側岸斜面を保護することを考えた。さらに、護岸
模型の前面には詰め杭に対応した法留め工としてトタン板を水路底面まで差し込んで河床洗掘が護岸の下部
に及ばないようにした。このトタンの前面にも法覆い工と同じ礫を1層敷き並べ、根固め工を模した。予備
実験の結果、模型河道の容量は河岸満杯で約401/s、低水路満杯で約131/sと判ったので、洪水時としてこれ
らの2流量、平水時として低水路の一部を流れる31/sの3段階の定常流量を設定し、蛇行部の中央における
半波長の計測区間ができるだけ等流状態となるように下流端の堰で水位調節し、上流端から給砂しながら通
水した。蛇行頂点(位相角90°)を挟む上下流の変曲点(同0°及び180°)とその間を3等分する位相角60°及
び120°の4断面において、通水中に水面形状及び流速分布を測定し、停水して金網を礫ごと取り除いて路床
形状及び側岸形状を計測した。

3. 2 実験結果とその検討

A シリーズのRun 1 とRun 2 では、水位が高水敷に達しない小出水時の場合であって、河床勾配から算定した平均摩擦速度が路床砂の移動限界摩擦速度よりも小さいか同程度の値であったために、その移動は水路の上下流端の一部を除いて見られなかった。流量を増加させたRun 3 では、低水路部の全面で流砂が存在していて、平均摩擦速度が路床砂の移動限界をやや上回っていたことと対応していた。しかしながら、路床形状にはほとんど変化がなく、後述のように、流れの乱れ変動が著しい根固め捨て石の周辺でも局所的な路床洗掘は認められなかった。さらに、勾配を急にしたRun 4 では、低水路床上的の流砂移動は一段と激しくなり、波長0.6~1m、波高約2cmの3次元的な河床波が形成され、根固め捨て石周辺の路床洗掘も明確になって、最前列の捨て石が転動していった個所も認められた。また、階段護岸模型の上面を保護していた礫が流送され、路床砂が露出している状態も散見された。

一方、B シリーズでは、当初上流での減勢と整流がでず、Run 1 では、水位・流速の変動が顕著であったが、下流の路床や護岸上の砂粒移動は僅かであり、簡易・詳細模型区間での砂粒移動に差異は無かった。流量を1.6倍にしたRun 2 でも路床上の砂移動はそれほど増加せず、最上流部を除いて路床の変化は認められなかった。階段護岸模型上面を礫で覆い、捨て石を設置したRun 3 でも、平均掃流力が低いために、捨て石部周辺でも路床に明確な変化は生じなかった。Run 4 では、整流板の設置によって最大流量にもかかわらず、水面の動揺が抑制され、明らかに流速変動は本シリー

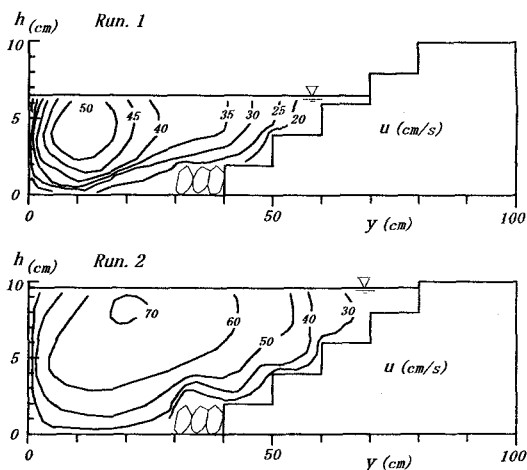


図7 A シリーズにおける横断面内流速分布

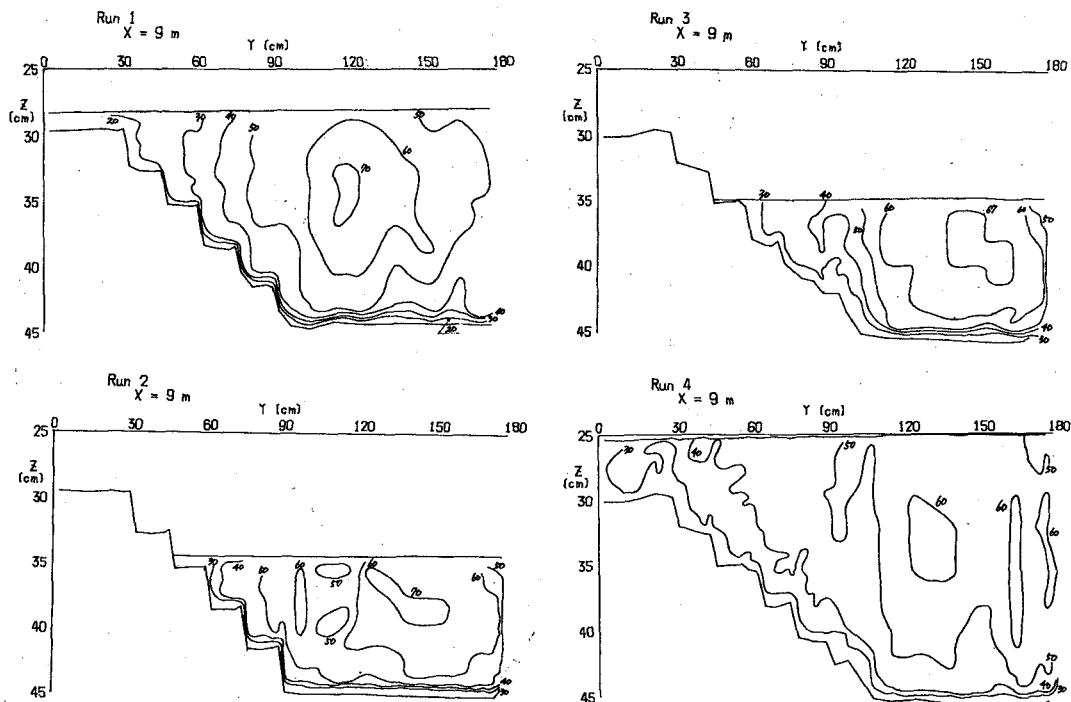


図8 B シリーズにおける横断面内の流速分布(等流速線の単位: cm/s)

ズ中最小となった。低水路床土の土砂移動はかなり活発となって砂堆も形成され、周辺路床の洗掘による捨て石の僅かな変位も生じた。また、護岸模型上面でも礫の間からの砂が抜け出していくことが観察されたが、礫自体の移動は認められず、上面の形状変化には至らなかった。

図7には、AシリーズのRun 1及び2における横断面内の等流速線図を示しており、また、図8には、BシリーズのRun 1～4における同様の流速分布を示している。これらから、全実験で水深増加とともに流速が急増していくことが判り、同時に、個々の段差部では、等流速線が段先端付近で上方に離れ、一方、隅角部に向かって入り込んでいる傾向が明確であって、複断面水路で観察されているものと類似の2次流の存在が認められる。護岸上面を礫で覆っていないBシリーズのRun 1、2では、その上方の等流速線が密になっているのに対して、覆っている他の実験では、この部分の等流速線が疎らになっていて、底面粗度の相違による影響が明らかである。AシリーズのRun 1、2及びBシリーズのRun 3、4では、捨て石部での流速が明らかに路床部や護岸低部のものよりも低くなっており、捨て石は大きな粗度要素として流れを減速し、護岸の法先周辺を保護していることが分かる。しかしながら、前述のように、周囲の路床は洗掘される傾向にあるので、実際には、それ自身の安定性が問題となってくる。

こうした点を含め、両シリーズともRun 2とRun 1では、潤辺付近の流速分布は互によく似ており、また、土砂の移動も似た状況にあり、BシリーズのRun 3とRun 4でも同様であって、実験装置の制限から、水路全断面に亘って高流速を発生させることができない場合でも、流量を低水路や護岸の低部に集中させることによって、強い流体力を受ける護岸低部の高水位時における状況を模擬することができると判断される。

つぎに、図9は、AシリーズのRun 1及びRun 2における流下方向流速の乱れ強度の分布を等値線によって示している。根固め捨て石の前方や上方で乱れが大きくなっていることが明瞭であり、これは、BシリーズのRun 3、4における流速測定結果のグラフでも確認されている。これに対し護岸上では、段先

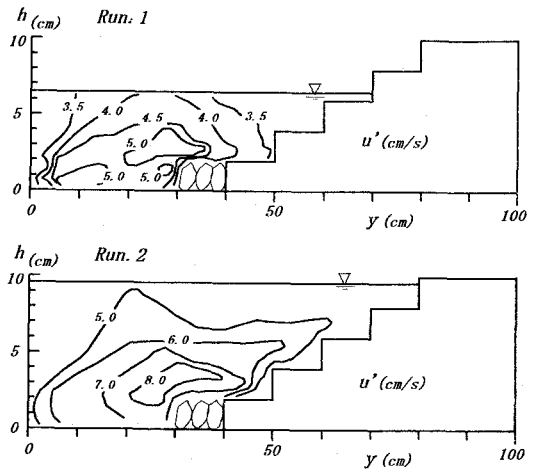


図9 Aシリーズにおける横断面内乱れ強度分布

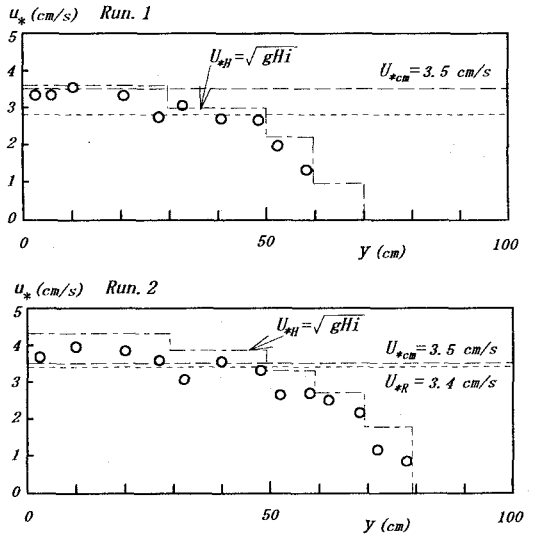


図10 Aシリーズにおける横断面方向摩擦速度分布

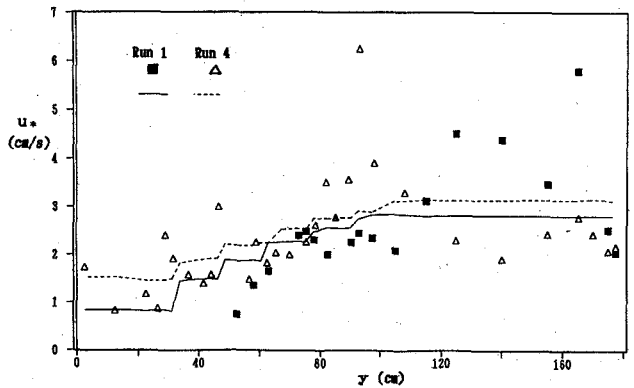


図11 Bシリーズにおける横断面方向摩擦速度分布

端部でやや減少するという流速分布に対応した分布となっている。

図10には、同じ実験について、路床に最も近い上方3または5mmの測点における流速から、対数則を仮定して求めた底面摩擦速度の分布を局所水深と路床勾配からの算定値と比較して示している。前者は、後者に対して、ほぼ等しいか僅かに小さい値であって、流速分布を反映して、全体的に階段状に分布しているが、捨て石部の周辺ではより小さくなっている。一方、図11は、BシリーズのRun 1及びRun 4について、片対数表示した流速分布の勾配から求めた摩擦速度分布を同様に局所水深と路床勾配による値と比較して示している。Run 1、4とも局所的に路床砂の移動限界を越えていて観察と一致しており、護岸模型の段差付近での水深増加に対応して急増した後、低水路方向へ減少していくという変化も似ているが、分布の最大値はRun 1では低水路中央付近、Run 4では根固め付近に生じている。このRun 4の最大値の位置は、図10のBシリーズで摩擦速度が根固め周辺で減少したと矛盾しているが、これは摩擦速度の評価方法の相違によっている。流速分布図ではあまり明確ではないが、捨て石上部での速度勾配は他の部分に比して急で、乱れ強度分布からも類推されるように、流体の混合が盛んでレイノルズ応力はかなり大きくなっていると思われる。この応力のほとんどは最終的に路床底面で受け持たれるので、やはり、この部分に底面摩擦速度のピークが現れると判断される。以上のように、根固め捨て石は、流速の低減効果が大きく、背後の護岸を保護する役割を果たすことが期待されるが、同時に、乱れを誘起し周辺路床の局所洗掘を助長する可能性も高いので、根固めの効果をより発揮させるためには、巨石の配列とともに、その空隙を粒径のやや小さい岩石で詰めていき、路床面における水流の乱れを減衰させておく必要があると思われる。

最後に、Cシリーズの実験では、前述の3段階の定常流量の通水によって路床及び礫で保護された側岸の形状は図12のように変化した。路床勾配が1/100と直線実験に比してかなり急であったので、流量3l/sの場合

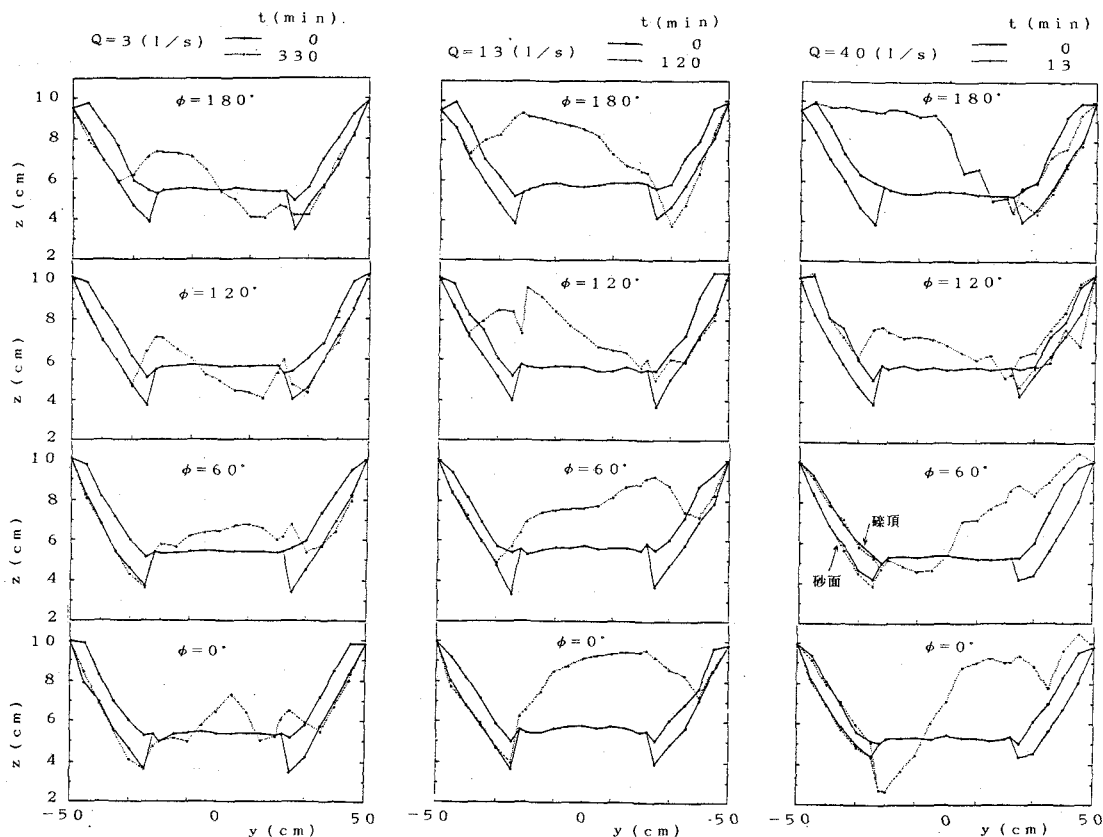


図12 Cシリーズにおける流路横断形状の変化

でも砂粒の移動は活発であり、同図のように、測定可能な程度の側岸からの抜け出しも生じたが、小流量であったので、両岸での明確な水位差は現れなかった。流量13l/sの場合には、砂粒の移動、抜け出しとも顕著になり、高水敷の天端に達するような河床堆積も生じて、護岸模型の礫も流送され始めた。流量40l/sの場合には、路床の変動はさらに激しくなり、護岸模型上の礫の流送も活発になったので、通水は13分で終了せざるを得なくなった。また、このように激しい流れであったので、流速や水位の測定は困難であった。

本実験では、側岸の平均勾配が5割と非常に緩やかであるために、鉛直側壁による従来の多くの弯曲水路の実験に比して護岸模型上の流速は低くなっており、かつ緩弯曲であるために2次流は比較的発達しにくい条件にある。実際流れの状況もそのようであったが、法先のトタン板の前面が洗掘を受けた場合には、その部分に小規模だが強度の高い2次流の発生することが観察され、これが流量13l/sや40l/sの場合の蛇行転向部における顕著な洗掘を引き起こしていた。今後このような流れを測定し、その評価を試みる必要があると思われる。

4. おわりに

代表的な多自然型護岸を対象に、その周辺流れの特性把握を中心に実験的な検討を行い、階段状の多自然型護岸でも各段ごとの流速分布の特性には、従来の複断面水路実験で観察されてきたような特徴があることを確認した。また、根固め工として用いられる巨石の捨て石群には顕著な水流の減速効果があることを見出すとともに、乱れ強度が大きくなるのでその対策を施すことが重要であることを指摘した。

現在、実験ケースは単純な条件に限定しているが、今後、直線流路では、護岸上部の礫が活発に移動する条件下で実験を行い、さらに、高水敷からの流れの落ち込みもあるような場合についても条件を拡張するとともに、蛇行流路では水衝部を中心に流れの詳細を把握するための実験を試みていく予定である。本実験やそれらの結果によって、こうした護岸周辺の流れの水理機構を明確にし、その環境・防災機能を考察して、適用性を明らかにしていきたい。

最後に、本研究は、平成4～6年度文部省科学研究費補助金試験研究(B)(1)『最新の移動床研究に立脚した多自然型親水性河道の設計指針の確立』（研究代表者：京都大学工学部・村本嘉雄教授）および財団法人河川環境管理財団平成5年度河川整備基金助成から多額の補助を受け、実施したものであることを付記します。日頃関心を抱いていた多自然型護岸の問題に関して研究の補助と機会を与えて頂いた、(財)河川環境管理財団・芦田和男先生、京都大学・村本嘉雄先生を始め、関係の各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局監修：Report of the River Council-安全で美しい水系の創造一、今後の河川整備はいかにあるべきか、(社)日本河川協会、1993、207p.
- 2) 安田 実：多自然型川づくりの取り組み状況、河川、No.541、1992、pp.31-38.
- 3) 高木不折：欧州における近自然型河川工法、1991年水工学に関する夏期研修会講義集Aコース、A-4、土木学会水理委員会、1991.
- 4) 河村三郎：多自然型河川工法はいかにあるべきか、多自然型川づくりシンポジウム講演論文集、1991.
- 5) 関 正和：多自然型川づくりへの取り組み、河川、No.541、1991、pp.5-12.
- 6) 建設省河川局治水課・都市河川室・防災課：平成4年度多自然型川づくりパイロット工事の実施事例.
- 7) (社)全国防災協会・(社)日本河川協会：蛇籠の知識、1963、166p.
- 8) 藤田裕一郎・村本嘉雄・井澤 寛：多自然型護岸の水理機能に関する一実験、京都大学防災研究所年報、第37号B-2、pp.441-458.