

多自然型護岸の水理機能に関する一実験

藤田裕一郎・村本 嘉雄・井澤 寛

AN EXPERIMENT ON HYDRAULIC FUNCTIONS OF RICH-IN-NATURE REVETMENTS

By Yuichiro FUJITA, Yoshio MURAMOTO and Kan IZAWA

Synopsis

About 1000 rich-in-nature river works are being carried out by central and local governments as pilot projects in the beginning of 1992. As revetment works occupy the main portion in river improvement works, various types of rich-in-nature revetments are being applied in many rivers. Their hydraulic functions, especially their strength against flood and bank protection capability, have risen as one of important subjects of river management in Japan.

Some aspects common to rich-in-nature revetments were discussed, showing several examples and a typical but conceptual type of them was focused. A five-step type of revetments with mean slope of 1 : 5 was chosen to be studied by hydraulic experiment. Four runs were carried out to examine its hydraulic performance by using two models and measuring velocity fields. Secondary flows and their influence on shear distribution were detected from velocity distributions. Riprap of toe protection proved to reduce flow velocity largely but to produce a certain range of velocity fluctuations, sand bed around individual stones being scoured.

1. はじめに

従来の河川事業は、その時点の技術レベルに制限されながらも、如何に効率良く治水安全度の向上を図り、かつ、如何に無駄なく水を利用するかといった、治水・利水に最重点が置かれて実施されてきた。とくに、河道の安全を目的とする河川改修事業では強固な構造物が要求され、施工性と経済性から改修後の河道はコンクリート水路ようになる場合も多く、ともすれば日常的に接する河川の風情は蔑ろにされる傾向にあった。

しかしながら、最近の人々の意識は、単なる量的な豊かさに加えて質的な豊かさ、すなわち、潤いやゆとりも求める方向に変化しつつあり、それに伴って、河川改修事業も、治水・利水に加えて河川の環境機能を強く重視する方向に大きく変化している。「多自然型川づくり」事業もそうした要望の下に始められた「潤いのある美しい水系環境を創造する」河川改修事業の中心施策の一つである¹⁾。建設省河川局が1991年11月に「多自然型川づくり実施要領」をとりまとめて、全国の地方建設局や都道府県などに通達したことに伴い、1992年度から各地でそれに基づいた「多自然型川づくり」が展開されてきた²⁾。

この「多自然型川づくり」事業は、河川の治水安全度の向上を図りつつ、自然環境の維持・増進にウェイトをおき、河川の生態系にとって良好な環境を保全、創出しようとするものであり、同時に、周辺の風土に

調和した景観を醸し出すこともその重要なポイントとされている³⁾。そのための技術的基礎が多自然型河川工法であって、それは、起伏をもつ河床、流下方向に広がりや狭まりをもつ河道など変化に富んだ河道の創出、魚の遡上に配慮した河道横断構造物の設計・施工、および、河川環境として優れた河岸と護岸の設計・施工、に大きく分けられている⁴⁾。また、その調査・計画・設計・施工・維持・管理の各段階における技術的な課題も指摘されている⁵⁾が、本研究の主題には直接関係しないのでここでは触れない。

このような「多自然型川づくり」のなかでも、護岸は施工延長が長いだけに河川環境に与える影響が大きく、パイロット事業に占める割合も高くなっていて、河川の生態系にとって良好な環境を維持・増進させるような機能を持たせることが強く求められている。このため、現在、施工に当たっている現業諸機関では一般的に施工されてきたコンクリートブロック練り積み護岸に替わる、より環境機能に優れた新たな形式の護岸構造物の創出に向けて摸索を続けており、各地で様々な形式の護岸が試験的に施工されている。しかしながら、従来の護岸構造物についても洪水時の挙動や極限的な強度は必ずしも十分に把握されているとはいえず、まして最近になって開発の始められた多自然型護岸工の防災機能については全く明かにされていない状況にある。

本研究では、まず、こうした多自然型の護岸構造物の施工例をいくつか検討して、その特徴を要約するとともに、その防災機能を評価するための実験対象とする多自然型護岸の形式を明確にし、ついで、その護岸模型を作成して行った水理実験について述べる。すなわち、5列の階段状に配列された詰め杭による1段の段差に対して、幅が数倍ある面上に天然石を敷き詰めた階段状の護岸について、その約1/20の模型を水路に平行に設置して通水した実験と、そこで行った砂粒移動の観察や護岸付近の流速分布や河床変動の測定結果について報告する。

2. 多自然型川づくりにおける護岸の施工例と特徴

多自然型護岸は、河川管理者の真剣な取り組みを反映して、最近の河川改修工事の中心的な課題となっており、実施例は急増している。建設省河川局治水課およびリバーフロント整備センターのまとめによると⁶⁾、1993年度初頭の全国の施工例は約1000に達しており、今後も増加して行くものと思われる。以下には、そのうちの数例を示してその特徴を述べ、多自然型護岸の条件を要約し、実験対象を明確にする。

2.1 護岸の施工例

Photo. 1の右側上下の写真は、災害復旧改良事業の一環として多自然型河川工法が適用された例である。大出水の頻度が減少していると、ともすれば環境面の重要性のみがクローズアップされがちであるが、「多自然型川づくり」の前提が、治水安全度の維持・増進を図りながら最大限に自然環境の保全、再生、創出を行っていくことにある点を見落すことはできない。**Photo. 1**左側の1990年出水直後の氾濫原の状況を見ると、日本のように洪水によって河道に厳しい条件の課せられる河川では、治水機能を無視して自然の保全を目ざすような川づくりが決して許されるものではないことが分る。わが国の中小河川整備の現状は極めて低い状況にあり、土地にも十分な余裕のない条件下で行われる「多自然型川づくり」は、**Photo. 1**のように従来のコンクリート護岸主体の河川工法と大きくは変わらない程度に妥協せざるを得ない面もある。

けれども、河道内に改修時の掘削によって現れた多量の巨石を、置き石として利用して河床に変化を持たせ、また、護岸工の一部分に凹型の狭まりを設け、そこにも巨石を配することによって河岸に大小の間隙を与えている。この写真のように、コンクリートを主体とした護岸の場合であっても、法面にわずかな凹凸を入れる等の工夫で単調で殺風景になりがちな改修後の河川景観にかなりの修景効果をあげることが可能である。同時に、場所によって法覆い工に用いられている材料が変えられていることが写真から判る。すなわち、大きな外力が働くと思われる弯曲部外岸には、従来のコンクリートブロック護岸工が用いられているが、流れが直線的である場所には玉石張り工を用いたり、他の場所では木工沈床に類似の形式の護岸も適

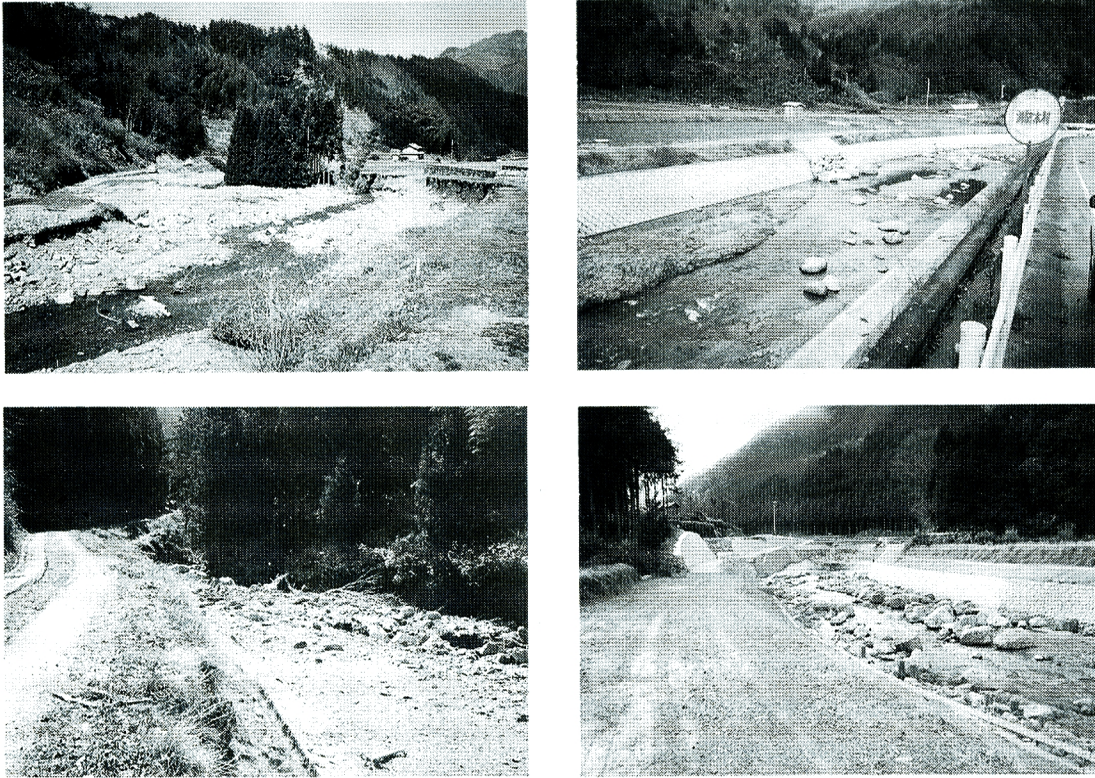


Photo. 1 Flood damage in 1990 and river improvement after that in the Takinoya river, a tributary of the Maruyama river, Hyogo prefecture.

用されている。このように、治水安全度を保持しつつ、できるかぎり周囲の風景に馴染ませようとしている試みは、多自然型川づくりの基本理念に十分適っているものである。

同様に、市街地を流れる川について多自然型河川工法を適用した場合でも、**Photo. 2**のように、河岸は河積を確保するために切り立たざるを得ず、表面には自然石が使用され、フラワーポットが設けられたり、根固めや水制に沈床工が使用されているが、基本的にコンクリートを多用した護岸となることは避けられない。多自然型川づくりでは、基本的に河道敷の面積が多く必要とされる。例えば、植生などによって河岸の保護を図る場合にも、植生が生育可能なだけの十分な余地が必要となるが、写真のように市街地に近接して流れる河川では、河道の拡大をする余地がないため可能な限り護岸を配慮した川づくりとなっている。

Photo. 3は、実験対象とした護岸の一部と比較的類似した構造を有する多自然型護岸工の例である。比較的緩やかな法面に自然石を配置し、ジオテキスタイルのネットですそれを保護するとともに、護岸前面下部を根固めを兼ねた詰め杭と中に割石を充填した木工沈床で保護したものである。ジオテキスタイルネットです保護した部分の天端には、植栽として付近に生えていた笹が用いられていたが、撮影時点では明確には成育していない。

Photo. 4は、布団籠を中心として施工された階段状の護岸である。このような鉄線あるいは竹などで網の目状に籠を編み、その中に玉石・割石などを充填したものを総称して蛇籠と呼ぶこともあるが、蛇籠法は、千数百年前に日本に伝来した後、改良が加えられ続け、昭和30年代にはほとんど完成に近い状態になっているといわれている⁷⁾。主に鉄線が錆びるためにその耐用年数が10年～15年位となって、永久的な土木材料ではないと認識され、さらに近年詰め石の入手難という事情が加わって、現在までにはほとんどがコンク

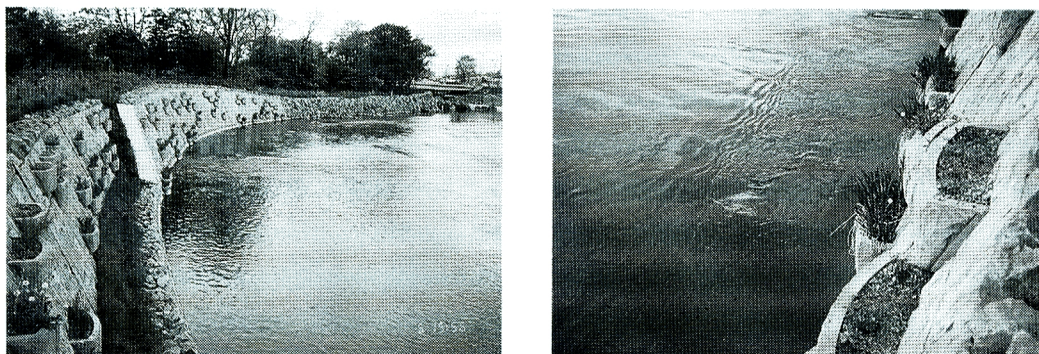


Photo. 2 Revetment as a kind of rich-in-nature river improvement works in the Chitose river, Hokkaido prefecture.



Photo. 3 Revetment as a kind of rich-in-nature river improvement works in the Izushi river, a tributary of the Maruyama river, Hyogo prefecture.

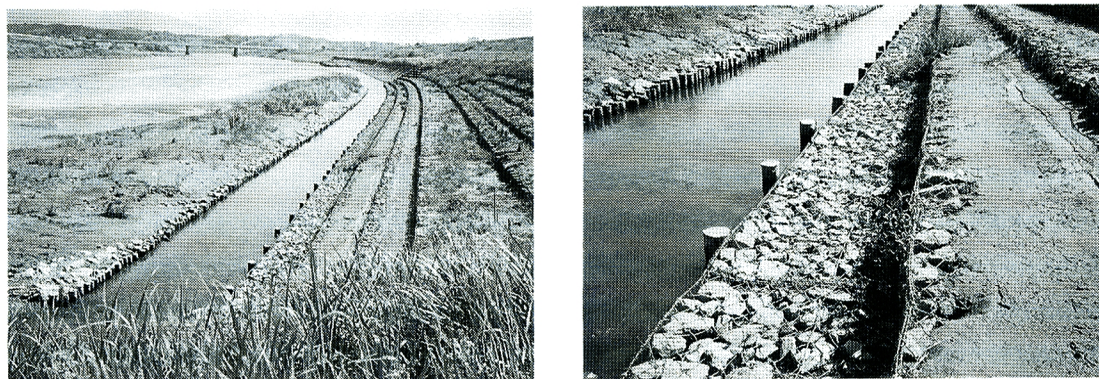


Photo. 4 Gabion type revetment as a kind of rich-in-nature river improvement works in the Kikuchi river, Fukuoka prefecture.

リートブロック工法に置き換えられてきた。しかし、蛇籠工法は透過性や、屈撓性に優れている等の長所があり、多自然型河川工法の一種として再認識されている。鉄線が腐食した後の強度も評価した上で、長所を發揮させるような箇所を選んで使用していくことが考えられる。

この**Photo. 4**は、出水後に撮影されたものであって、階段状に積まれた布団籠の詰め石の間に増水時に運搬されてきた細かい土砂が堆積している。布団籠の透過性・多孔性を活かすのであれば、これらの土砂を早急に取り除くことが求められ、一方、上部が植生で覆われることを期待しているのであれば放置も可能である。目的に応じて、多自然型河川構造物を維持・管理していくことが必要である。

2.2 多自然型護岸の特徴

上述の4施工例からでも容易に推察されるように、河川の規模、周囲の環境などが多岐に亘るために、多自然型護岸工の種類、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配慮しているが、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意味も明確にはなっておらず、これは、実験対象をどのように限定するかということとも関連する問題である。そこで、ここでは他の事例の検討結果も参照して、抽象的であり具体的な程度に差異はあるが、「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」を多自然型護岸と見なすこととした。

このような護岸では改修の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。すなわち、そのために、護岸は改修に天然素材が多用され、ある場合には素材自体が柔らかくて、多孔性で屈撓・柔軟性に富んだ構造となっており、同時に、護岸の改修によって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ている。

こうした多自然型護岸工法として、木、石、植物、鉄線を使用した、木工沈床、蛇籠、粗朶沈床、柳枝工などの伝統工法を適用しようとすれば、その強度を再評価したうえで、場所を選んで施工していかねばならない。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、前掲の**Photo. 3**や**Photo. 4**のような伝統的工法による多自然型護岸工は、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であろうと思われる河岸を選んで適用されている。

いずれにせよ、こうした伝統的工法と最近のコンクリートブロック工法の長所をしっかりと把握し、適切な場所に使用していくことが重要である。そのためには、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、適用現地で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も不可欠である。しかし、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、

既往の水理学的研究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直接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の、強度が比較的低いと思われる護岸を対象として、その水理特性に関する実験を行うこととした。

3. 多自然型護岸工の水理機能に関する実験

3.1 実験の対象とする護岸

多自然型護岸工は、前述のように現在模索されている最中であるだけに、各地で多くの種類のものが河道の状況に合わせて試験的に施工されている。そのうちの主なものでも、コンクリートブロックを自然石に替えた練積み護岸・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、それと柳枝工を併用したもの、木工沈床や柵工を河岸上部まで適用したもの、蛇籠・布団籠で覆ったもの、詰め杭と栗石を併用したものなど、昭和30年代まで普通に用いられ、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が再び取入れられようとしている。

それら全部について水理特性を把握し、その防災機能を評価することが実際には必要であるが、外形が類似の護岸に働く流体力にはそれほど大きな相違がないと判断される。例えば、単一斜面を持った護岸については、使用されている材料を問わず従来のコンクリートブロック護岸の場合と本質的な差がないと考えられ、せん断力分布の評価等研究も以前から行われている。また、自然石が用いられていても練積みであれば、コンクリート護岸とは構造的には付着力が、水理学的には表面粗度が異なる以外の差は小さいといえる。一方、階段状の護岸については、従来からコンクリート構造ではあるが、親水護岸として数多くの施工例があるにもかかわらず、その周辺の流れの水理特性はほとんど明らかにされていない状況にある。そこで、階段上の護岸であって、破壊・被災過程が顕著に現れるかなり弱い構造のものを選んで実験対象とすることが合理的であると結論した。

以上から、ここでは、階段状の外形をした護岸のうち、各段の法覆い工の栗石が個別に流体力に抵抗するため、構造的に最も弱いと思われる、Fig. 1に示したような5列の詰め杭と栗石を併用した構造の護岸を実験対象とした。この護岸工は、平均勾配が5割であり、根固め部の捨て石を含めた護岸部の全幅が約20mになる、かなり大きな緩流河川の低水護岸と見られるものであって、同一形式の植生で覆われている護岸は多自然型護岸の例としてよく引用されている。

3.2 実験装置の概要

実験には、京都大学防災研究所宇治川水理実験所のRIトレーサー実験施設内にある全長20.4mの鋼製可変勾配水路を用いた。この水路は、Fig. 2に示した概要の

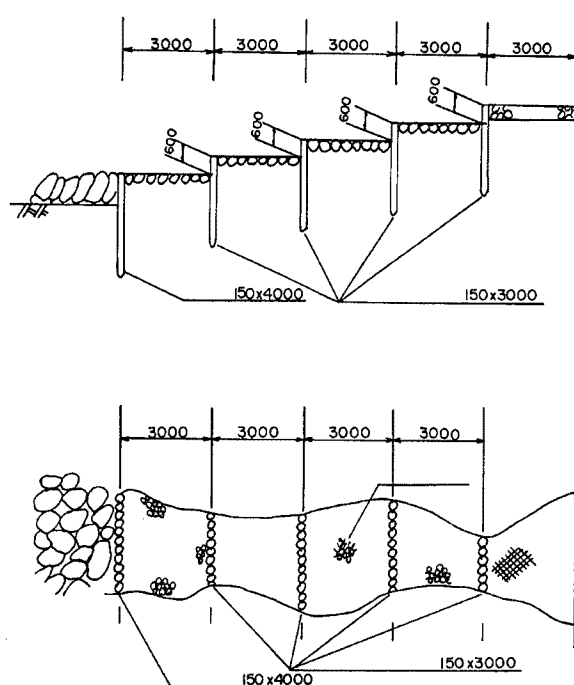


Fig. 1 Conceptual river revetment of a rich-in-nature type examined in hydraulic experiments.

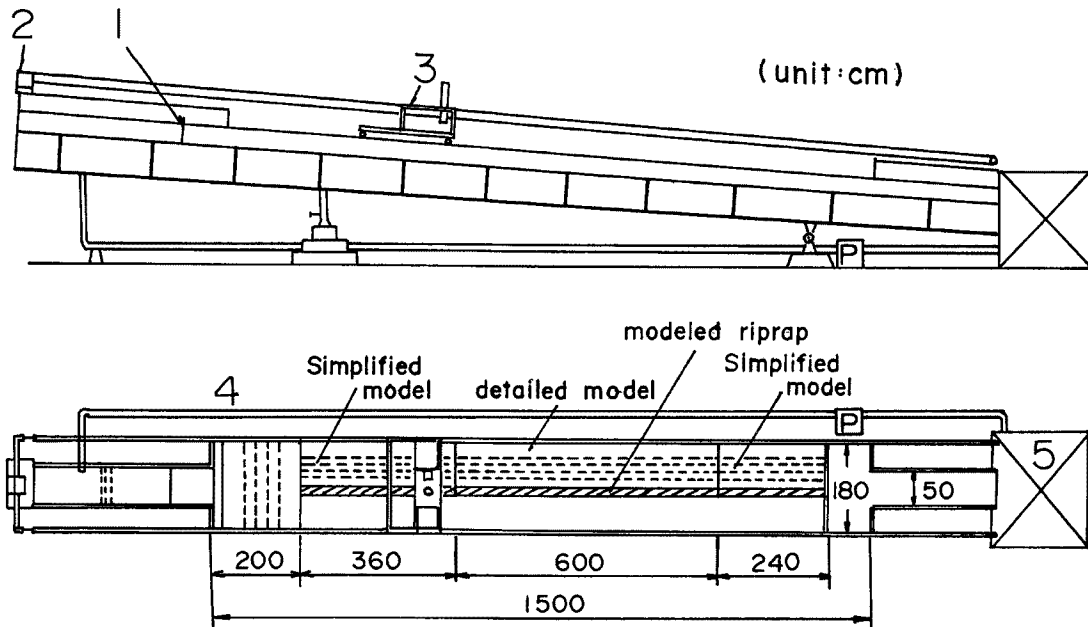


Fig. 2 Vertical (top) and plan (bottom) of the experimental flume.

1 : full width weir, 2 : traction motor, 3 : measurement carriage,
4 : water supply pipe and, 5 : storage tank.

ように、上流 3 m 区間と下流 2.4 m 区間にそれぞれ幅 0.5 m、深さ 0.55 m の流入・流出部を持ち、中央 15 m 区間が水路幅 180 cm の実験区間となっていて、水路勾配は水路下に取り付けられた手動ジャッキを用いて変えることができる。高さ 0.4 m の側壁上にはレールが敷設されていて、砂の敷きならしと計測のために上流端の変速のリングコンモータで牽引される鋼製台車が載せられている。通水には 3 相 3.7 kw の鋳鉄製自給式ポンプを 3 台用いて下流端の受水槽の水を循環させ、約 70 l/s の最大給水量を確保した。そのうちの 1 台には汎用インバータを接続して出力を調整し、残りの 2 台のポンプを併用して、実験条件に応じて種々の流量を流し得ることを可能とした。Fig. 2 の平面図のように、水路中央 15 m の実験区間のほぼ全域を整流部を含めて実験に用いるものとし、長さ 12 m にわたって護岸模型を設置した。

護岸模型は、Fig. 1 の護岸を 1/20 にしたものであって、詰め杭を鋼棒で模擬した詳細模型と合板で置き換えた簡易模型とをそれぞれ 6 m 長分ずつ用意した。前者の詳細模型は、Fig. 3 の左側のように、長さ 9.5 cm、12.5 cm、15.5 cm、18.5 cm、および 21.5 cm に切り揃えた直径 1 cm の鋼棒を、それぞれの長さ毎に 100 本づつを横に並べ、根元を長さ 1 m のアングル 2 本で両側から接着して直立するように固定して幅約 1 m のブロックを作成し、長さが異なる 5 つのブロックを 1 セットとしたものであって、これを 6 m 区間分すなわち 6 セット計 30 ブロック用意し、1 m 区間毎に色の異なったペイントで塗り分けて位置が識別できるようにした。一方、後者の簡易模型は、厚さ 9 mm、長さ 120 cm の合板を、幅 9.5 cm、12.5 cm、15.5 cm、18.5 cm、および 21.5 cm に切り分け、それらの板に 6 個所の穴を空け、直径 10 mm、長さ 1000 mm の寸切りボルトとナットで Fig. 3 の右側のように 15 cm 間隔で接合して、1 ブロックとし、これを 6 m 区間分、計 5 ブロック作成した。

水路は、実験区間 15 m を、Fig. 2 のように、上流から 2 m を整流区間、続く 3.6 m を上流側簡易模型区間、その次の 6 m を詳細模型区間、さらに 2.4 m を下流側簡易模型区間、最後の 1 m を流出・堰上げ区間とし、各模型を配置したが、実際には、詳細模型の作成時の接着のゆがみやアングルの歪によって多少の誤差が生じ、模型区間が下流方向にわずかに延長された形となった。その後、Photo. 5 のように、実験区間

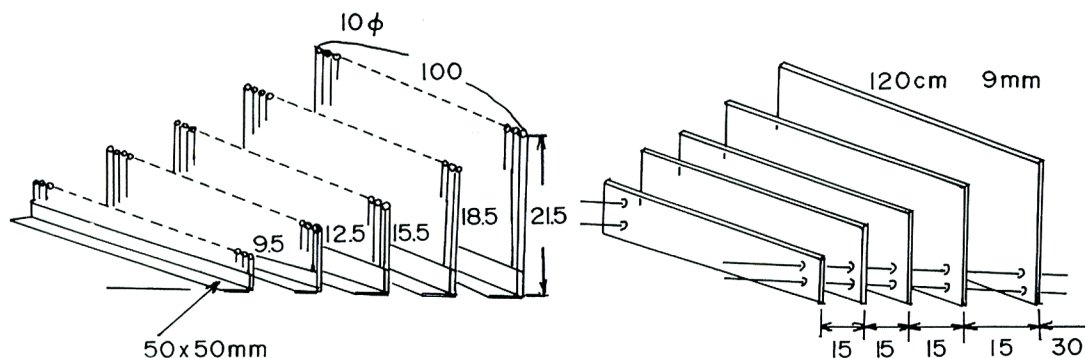


Fig. 3 Detailed model (left) and simplified model of the conceptual river revetment of a rich-in-nature type examined.

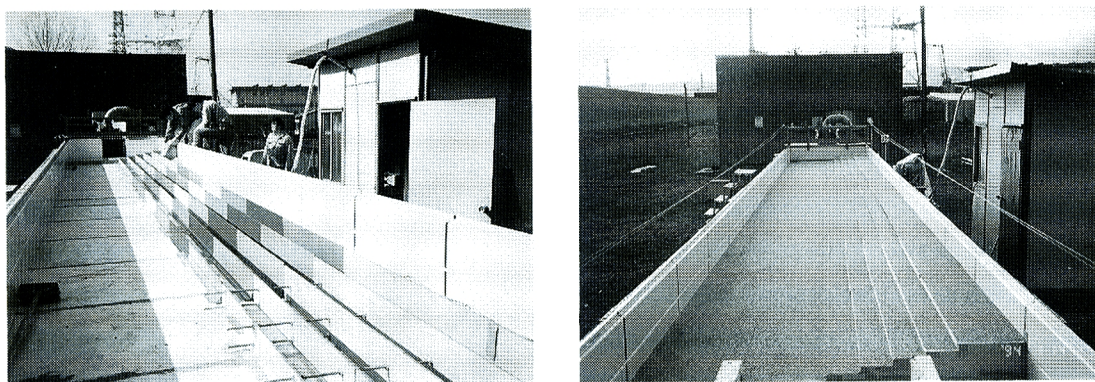


Photo. 5 Views of revetment model allocations and the experimental reach with coarse sand only.

の水平路床部には6.5 cm の厚さで実験砂を敷き詰め、護岸模型の間にも同じ砂を充填した。

実験の座標系は、水路実験区間の上流端を $x = 0$ m として流下方向に x 軸、左側壁を $y = 0$ m として右側壁方向に y 軸、 $x-y$ 面に垂直下方向に z 軸のようにをとっており、模型区間は $x = 2 \sim 14.1$ m となっている。

3. 3 実験方法

実験に先立って、水路の勾配を手動ジャッキによって調整し、水位や路床高測定のために、測定・敷均し用台車の計測台の高さを流下方向 1 m 毎の断面において、中央と両側の 3 点ずつでティルティングレーザレベルで測定した。ついで、水路側壁上の鋼製台車に護岸の形状に合わせて作成した整型板を取り付け、砂面を所定形状に敷均して水締めを行った。さらに、実験条件によって栗石で砂面を覆ったり、根固め捨て石を設置する場合には、設定厚さに合わせて造園用の直径約 10 mm の礫や直径約 50 mm の丸石を所定位置に載せ、礫の面は丁寧に手で押さえて礫間の砂面と礫の頂面がほぼ平らになるようにした。通水は上記の 3 台のポンプを用いて行い、流量は実験区間の上流の流入部である長さ 3 m、幅 0.5 m、深さ 0.7 m の鋼製水路区間に堰上げ高さ 35 cm の全幅堰を設け越流水深を測り、Rehbock 公式と石原・井田公式を併用して検定した。また、通水直前には、実験区間下流端と流出部の間に止水板をクランプで止め、低水槽の容量不足を補

うために実験区間に貯水するとともに、水位を保持できるようにして水位のキャリブレーションを容易とした。この位置には、通水中アングル等の鋼材を適切において実験水位を所定高まで堰上げるようにした。

実験の測定は、通水前後の路床高、水位、流速分布について行った。路床高は、 $x=2\sim14\text{ m}$ の区間を1 m 毎に横断方向約30点において触針式砂面計とポイントゲージで測定し、両者の読みと比較してキャリブレーションした。水位は、サーボ式水位計を用いて、 $x=2\sim14\text{ m}$ の区間を1 m 毎に横断面方向に $y=30\text{ cm}$ 、 90 cm および 150 cm の3点で約30秒間測定した。また、上述のように、それぞれの実験の通水直前に流出部を止水板で遮断して、実験水位を挟む2つの水位のデータを入力し、水位計のキャリブレーションを行った。最後に、流速分布は詳細模型区間の中央よりもやや下流に当たる $x=9\text{ m}$ の1断面において、水面が水路全幅を覆う高水位の場合、横断方向に32測線を取り、路床から5 mm 上の点から上方に5 mm 間隔で5点、ついで1 cm 間隔で3点、それよりも上は2 cm 間隔で水面まで、直径3 mm の超小型プロペラ流速計で約30秒間測定した。護岸模型を完全に水没させた全幅の場合、全測点数は約300点である。この流速測定位置の設定のために、 $x=9\text{ m}$ 断面では測線ごとの水位をポイントゲージで測定した。後半の実験では、礫間や丸石周辺の砂粒移動を把握するために、鋼製台車の上に脚立を据え付け、河床から約2 m 上方の脚立頂上部の位置にカメラを設置し、水路の全区間($x=0\sim15\text{ m}$)にわたって1~1.5 m 間隔で河床の平面写真を真上から撮影した。

なお、本実験でも、実験遂行の迅速化とデータの処理効率の向上のために実験測定の制御とデータ収録をできるだけ自動化するように努めた。すなわち、水路脇に設置されている実験の制御と測定用のプレハブ小屋内にAD変換ボードを増設したパーソナルコンピュータを装備し、水位および流速の計測値をAD変換ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込んで記録するようにした。同時に、流速分布測定時には、超小型プロペラ流速計の昇降装置として、リニヤヘッドを組み込んだパルスモータをパーソナルコンピュータで制御して、予め与えた水位と河床のデータに基づいてプロペラの高さが自動的に設定されるようにした。

3.4 実験条件

路床及び模型内に敷均した実験砂は、平均粒径 $d_m=1.42\text{ mm}$ の比較的一様な粒度分布を持つ粗砂である。平均粒径に対する限界掃流力 u_{*c} は岩垣式によると $u_{*c}=2.93\text{ cm/sec}$ である。礫や丸石を置いた状態の参照実験として砂のみの一様な路床状態における水流の状態を知る必要があったので、土砂移動をある程度抑制するため、本実験では、このようなやや粗い砂を用いている。

また、路床勾配と通水流量は、護岸模型の形状と水路内の設置位置から決まる水路横断形状に対して、路床砂からマニングの粗度係数を仮定し、予め計算した水利条件表に基づいて設定した。すなわち、護岸模型の天端を越える水位と模型の半ばが浸る程度の水位について、水利条件表の平均流速 v_m や平均摩擦速度 u_* を路床に敷き均した粗砂の移動限界摩擦速度 u_{*c} ($=2.93\text{ cm/sec}$)と比較し、給水能力と流速分布測定の必要性から、移動限界を僅かに越えるような条件を与えることにした。

このような2水位を選んだ理由は、両水位時の流速分布を比較しておけば、今回のように、ポンプや低水槽の容量が小さくて、護岸模型を完全に水没させた状態では、法覆い工として使用されている礫を十分移動させることができないような場合でも、路床勾配を上げて最大流量を供給し、水位を低くして礫が活発に流送されるようにした場合の測定結果から、大きな洪水によって完全に水没した状態における護岸の挙動が類推できると考えたからである。

以上の考察から、まず、路床勾配は、ポンプの能力を考慮して1/2000に固定し、完全水没状態では、3台のポンプをフル稼働し、水位が護岸模型天端を約2 cm 上回るように下流の流出部直前の路床に適当な高さの山形鋼を置いて堰上げれば、ほぼ等流状態が形成されると判断した。また、護岸模型の半ばが浸かる水位条件は、ポンプ1台をフル稼働し、他の1台をインバータ周波数35Hzで運転すれば良いことが判った。実際の通水流量は、Table 1に示したように、実験中やや変化した。前者の全幅水没実験では、Run 1

Table 1 Changes in discharge supplied to each run of the experiment and its water temperature

Run No.	Time hour min	Discharge l/sec	Water Temperature
1	1 00	58.14	11.0 °C
	1 22	55.30	10.5 °C
	3 43	54.74	9.5 °C
	5 37	54.74	9.0 °C
	7 16	54.74	9.0 °C
2	1 10	33.14	11.0 °C
	2 10	33.14	11.3 °C
	3 15	33.14	12.0 °C
	7 57	34.08	12.0 °C
3	1 42	34.08	9.0 °C
	4 50	30.84	8.0 °C
	6 08	31.75	7.1 °C
4	1 00	69.40	10.5 °C
	1 35	70.63	12.8 °C
	3 45	70.63	11.0 °C
	5 45	68.79	12.0 °C

において 54~58 l/s, Run 4 において 66~70 l/sec, 一方, 後者の実験では, Run 2, 3 とも 32~35 l/sec であった。

最初に, 法覆いや捨石を模擬した礫や丸石の影響を知るための参照実験として, 粗砂のみで路床と護岸模型を充填した条件で, 上記の 2 水位の実験のうち, 高水位の Run 1 を行い, 一度河床を敷均して低水位の Run 2 を行った。その後, 砂面を再び敷均し, 護岸模型の表面には約 10 mm の礫を重なり合わないよう 1 層だけ敷き, また, 護岸根固め模型として約 50 mm の丸石を約 15 cm 幅で実験区間全長にわたりやわ 1 層で, その高さが護岸最下段の天端と大体一致するように敷き詰めた後, 最初に低水位での Run 3 を行い, 路床測定後引き続き高水位での Run 4 を行った。

3. 5 実験結果とその検討

(a) Run 1 の結果

最初に行った粗砂のみで高水位の Run 1 では, 流入部での整流と減勢がほとんどできなかったことが実験区間の流れに最も大きな影響を及ぼしていた。すなわち, 上流全幅堰から流入する水流の状況が予測できず, 上流 2 m の整流区間には減勢用にコンクリートブロックを配置してはいたが, 流入部からの流れが充分拡散せず, このために, 実験最上流区間の路床や護岸部の洗掘が顕著になり, 洗掘された砂はその下流に大きなデルタとして堆積し, デルタの先端が時間とともにゆっくりと流下していた。また, 水面の波立ちは下流区間まで減衰することなく伝播しており, 水位や流速には, **Fig. 4** に例示した $y=140$ cm の測定値のように, 時間的な変動が顕著であった。水路幅を 4 分する 3 測線の半水深位置における流速の時間的変化の測定結果を比較すると, 比較的穏やかな中央付近の変動に対して, 両側では水面波に対応したと見られるかなり長周期の大きな流速変動が生じているようであって側面で反射する進行波の影響が考えられる。しかし, 路床や護岸部の粗砂の移動は, 条件設定時に予測したとおり, 上流の洗掘区間やデルタの進行区間を除いて僅かであって, 簡易模型区間と詳細模型区間との間に砂粒移動に差異は認められなかった。

つぎに, **Fig. 5** には, $x=9$ m における流速分布の測定結果を等流速線図によって示している。最下部の

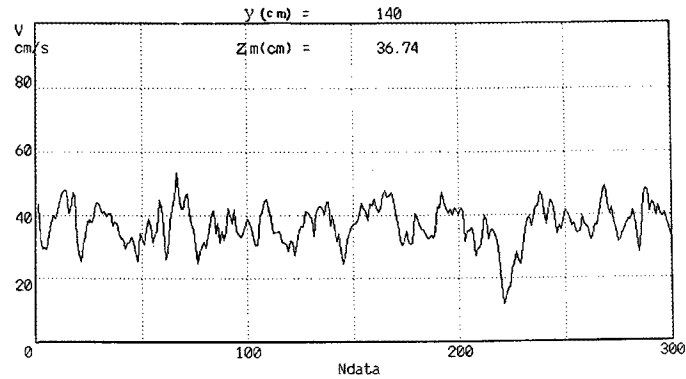


Fig. 4 An example of velocity measurement in run 1. Abscissa is data number and total measuring time was 28 seconds.

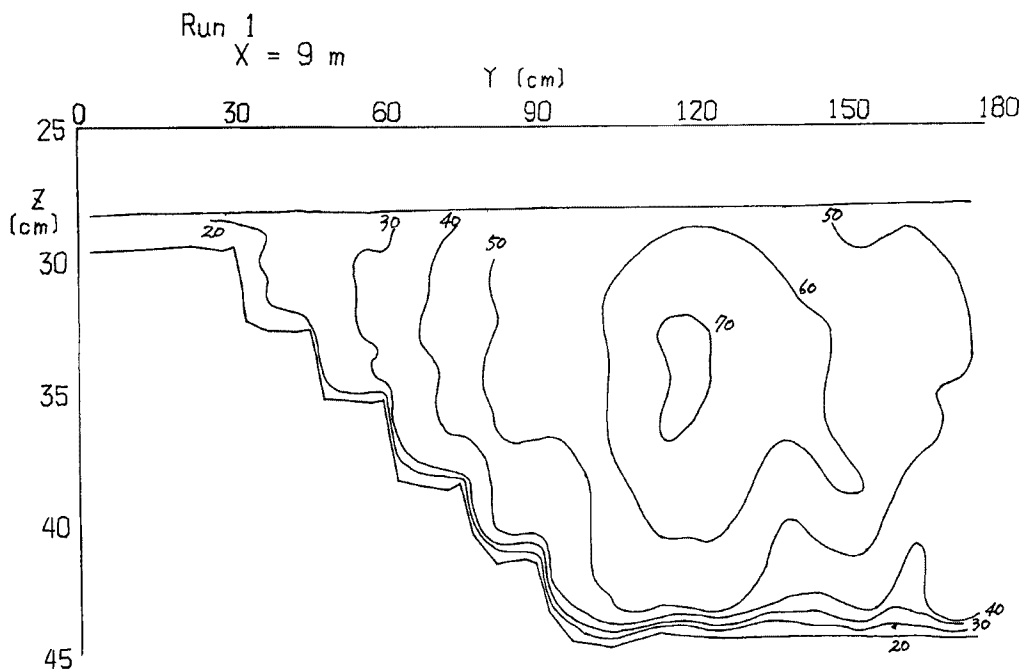


Fig. 5 Velocity distribution measured at $x = 9$ m in run 1. Unit of contour numbers are cm/sec.

路床線から判るように、護岸の各段の天端面や河床部は平坦となっているが、護岸の段差の詰め杭部の近傍では敷均し時の余剰砂が残ったために斜面となっている。これがこの実験での隅角部における流速の測定結果に若干の影響を与えていたようであるが、それぞれの段差の部分では、流速が詰め杭の側壁面に沿ってほとんど変化しておらず、隅角部付近でも流速が低下していないので、複断面水路で認められているような2次流が存在しているようである。しかしながら、最下段では隅角部の流速は小さく、また上述のように流速変動の影響が大き過ぎるため、実験中にはその存在をあまり明確には把握できていない。同図では、水深の増加の伴って流速が急激に増加して行くことが明確であるが、護岸模型と側壁の中間地点の $y = 135$ cm 付近

であっても、最大流速部が水面から数 cm 以上も潜っていて、護岸側壁の影響がある単断面水路で観測されるものに比較的近い流速分布となっている。今後、こうした点について 5 割の単一斜面と階段状斜面との相違について比較検討していくことが必要であると考えている。

(b) Run 2 の結果

Run 2 でも粗砂のみの路床・護岸部としたが、Table. 1 のように、流量が約半分となり、減勢に工夫するとともに上流 1.2 m 区間の護岸部を板で覆って固定床としたので、水面波の発生は著しく抑制できた。しかし、流入流向に対する考慮が不十分であったことや小水深であったことによって、上流部の流れは弯曲流に類似の特性を持ったようであって、最上流区間の護岸沿いの部分にはかなり大きな洗掘部が発生し、 $x =$

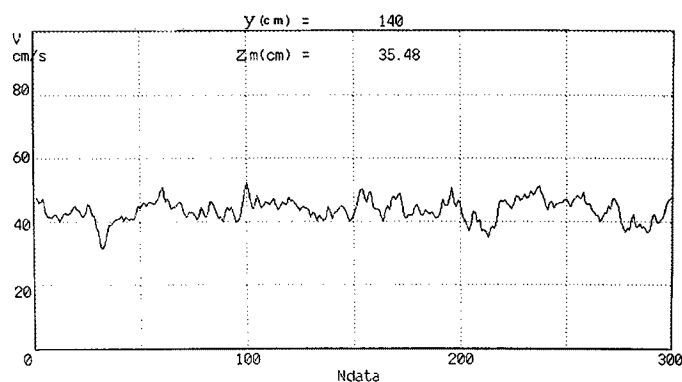


Fig. 6 An example of velocity measurement in run 2. Abscissa is data number and total measuring time was 28 seconds.

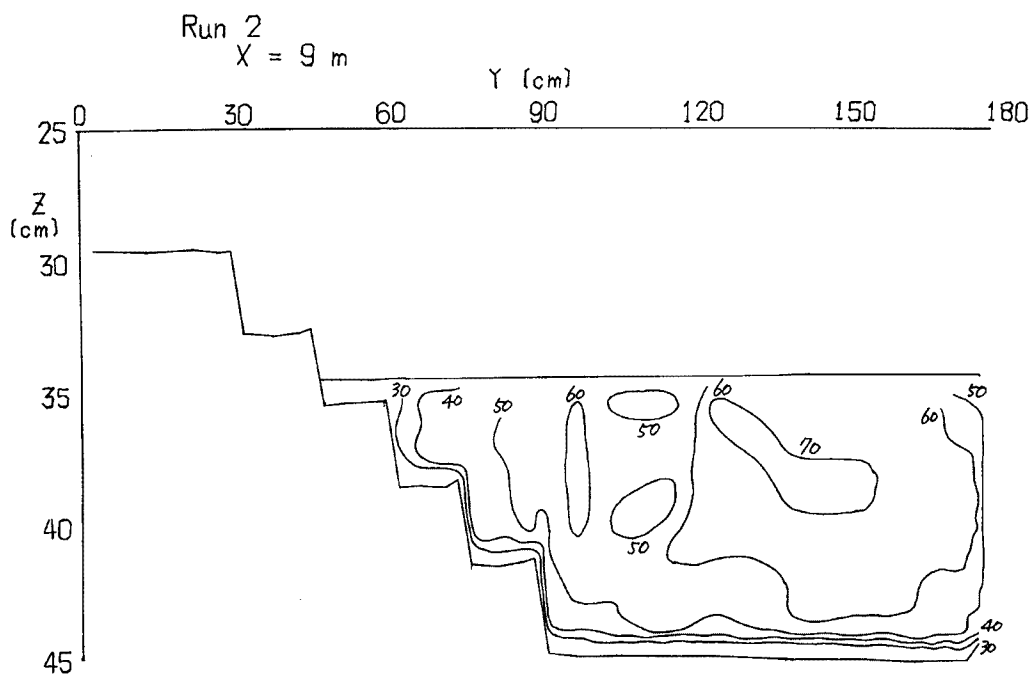


Fig. 7 Velocity distribution measured at $x = 9$ m in run 2. Unit of contour numbers are cm/sec.

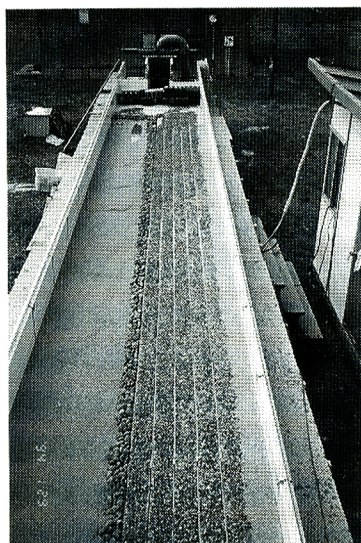


Photo. 6 Views of experimental reach with gravel covers and riprap models.

2 m の護岸付近から洗掘された砂が $x = 3 \sim 6$ m 付近に堆積していた。それ以外の区間では護岸の詰め杭部に残っていた敷均しの残余土砂が崩落したと思われる変化のみである。

流速の測定結果を例示した **Fig. 6** では Run 1 で顕著であった流速変動がかなり抑えられたことが良く判る。しかし、用意した流速測定プログラムでは、プロペラに糸くずなどが絡まることによる測定の欠落を取り除くことができなかったため、平均流速の出力値が非常に小さくなってしまった測点が生じた。そこで、**Fig. 7** の流速分布図は、この流速測定の欠落を考慮して作成したが、ここでも、右側壁近傍において最大流速位置が潜り込んでいること、護岸側からは水深の増加に伴って流速が急増すること、あるいは、二次流の影響で護岸各段差部の側壁に沿って流速分布が一樣となることなど、Run 1 の流速分布の下半分の状況とよく似た分布状態を示していることが判る。

(c) Run 3 の結果

造園用の礫や丸石を用いて、**Photo. 6** のように実際の状況を模擬した河床条件の Run 3 では、それとともに、整流部の減勢には流向の影響も考慮してコンクリートブロックや銅材を配置し、さらに流入直後の洗掘に備えて、捨石を模擬したと同程度の大きさの石を護床工のように用いて路床を覆った。これによって、路床の洗掘は十分抑制でき、護床部の直下流からわずかに洗掘された砂の堆積状態は、複列砂州の発生初期の状況によく似ていた。Run 3 の通水後の測定断面を検討した結果からは、この区間を除いて路床の変動はほとんどなかったことが判った。

Run 3 の流速測定結果には、測定が雨で行われたこともあって、例示した **Fig. 8(a), (b)** のように、出力電圧を瞬間的に低下させるような多くのスパイクノイズが認められた。流速分布図を描くために測定結果からその影響を除こうと努力したが、完全に抜くことが困難であったので、測定結果の平均流速値は下がっている。また、整流部を工夫したことによって、見かけ上の水表面の変動は小さくなっていたが、流速にはかなりの変動が残っていた。例示した $y = 140$ cm ではとくに流速変動が著しくなっていたが、**Fig. 8(a)** のように、それにはかなり長周期の成分が含まれている。一方、捨て石部周辺では、**Fig. 8(b)** に示した $y = 89.5$ cm のように、平均流速が護岸域の中央部とほとんど変わらないぐらいまで低下したまま、流速変動が大きくなっている。しかし、その周期は路床中央部よりも短くて、流速の平均と変動の両者に捨て石模型とした丸石が影響したものと考えられる。**Fig. 9** の流速分布図には、捨て石部を境に護岸部と路床部で平均流速値に大きな差が生じていて、この捨て石の影響が Run 3 の条件では全水深に及ぶことが示されており、捨て石工が護岸部を保護する根固め工として十分な機能を果たしていることが判る。

(d) Run 4 の結果

Run 4 では、Run 3 における路床および護岸部の変化が非常に小さかったので、そのまま最大流量を供給し、実験区間下流端を堰き上げて護岸天端を完全に水没させるだけの高水位を維持した。一方、上流整流区間には、**Photo. 7** のように、新たにパンチング銅板による整流板を 4 枚設置して実験を行った。これによって、最大流量にかかわらず、最上流部における河床の洗掘が Run 1~4 を通して最も軽微となるとともに、**Fig. 10** の流速測定例のように、水面や流速の変動も Run 1~4 のうちで最小とすることができた。その結果、路床部分における流速の測定結果には、通常の開水路実験と同様に、明らかに上方ほど変動が小さくなる傾向が認められた。また、護岸天端でも水深が約 5 cm と大きかったために、**Fig. 11** の等流速線図

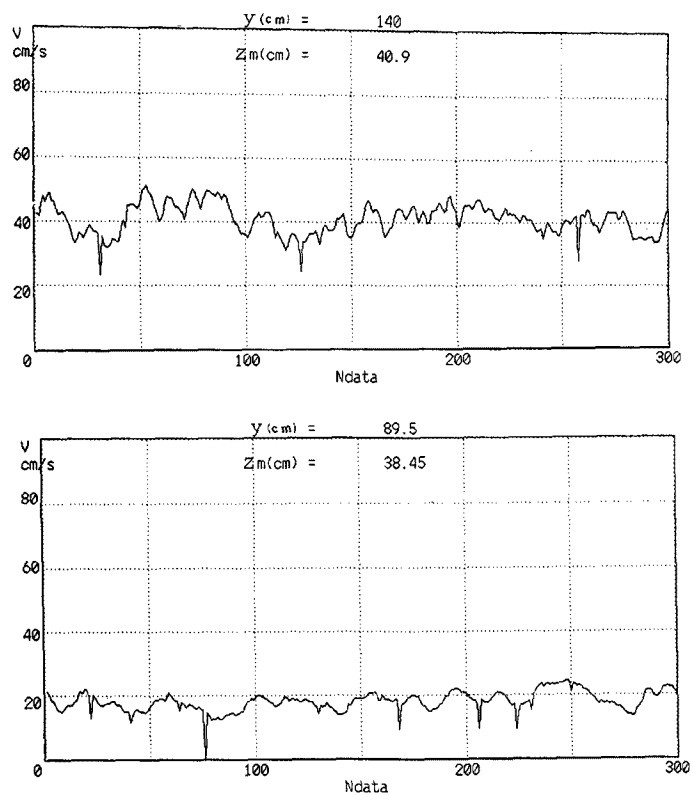


Fig. 8 An example of velocity measurement in run 3 (top: at the middle of sand bed, bottom: around riprap). Abscissa is data number and total measuring time was 28 seconds.

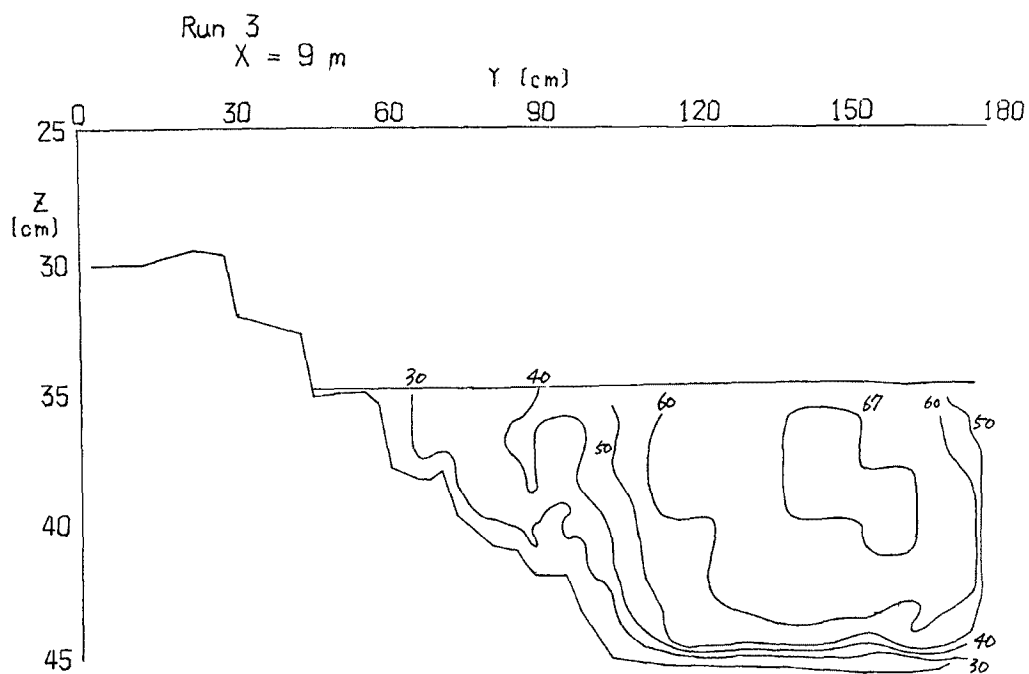


Fig. 9 Velocity distribution measured at $x = 9$ m in run 3. unit of contour numbers are cm/sec.

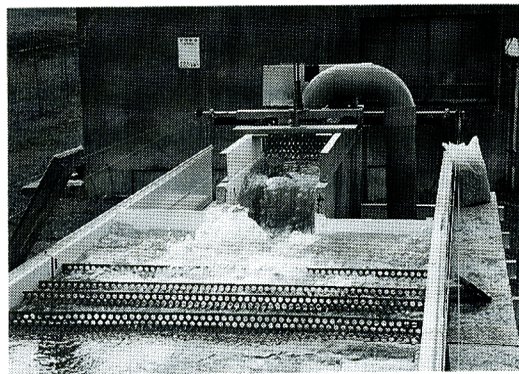


Photo. 7 Flow regulation in stilling part at the inlet.

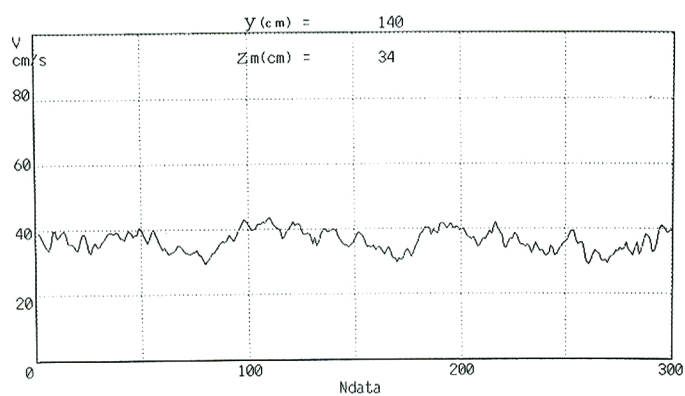


Fig. 10 An example of velocity measurement in run 4. Abscissa is data number and total measuring time was 28 seconds.

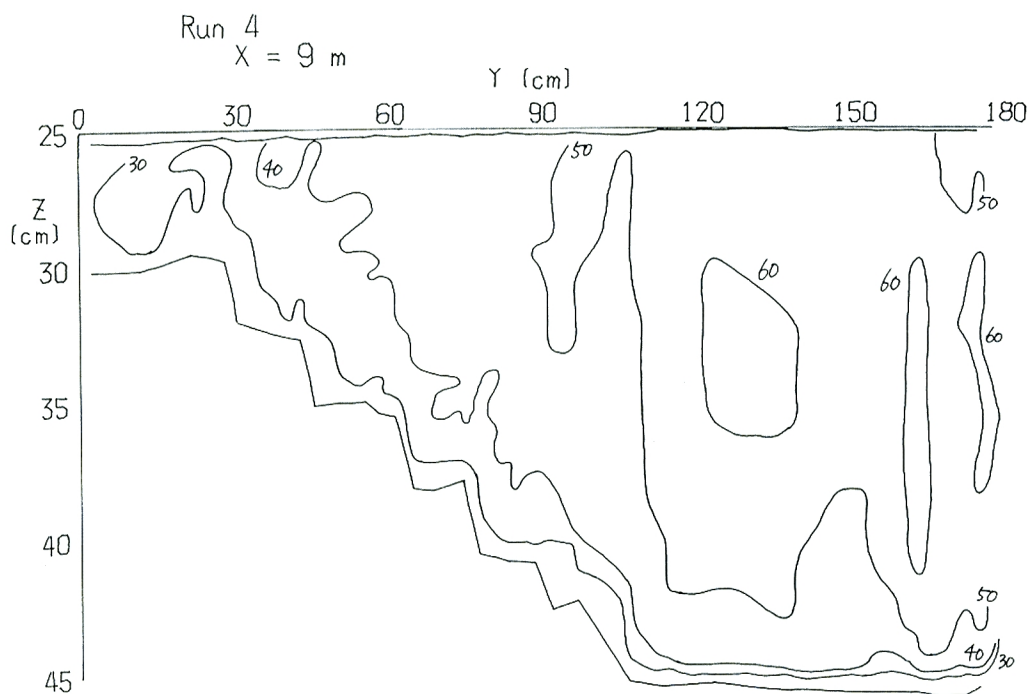


Fig. 11 Velocity distribution measured at $x = 9$ m in run 4, unit of contour numbers are cm/sec.

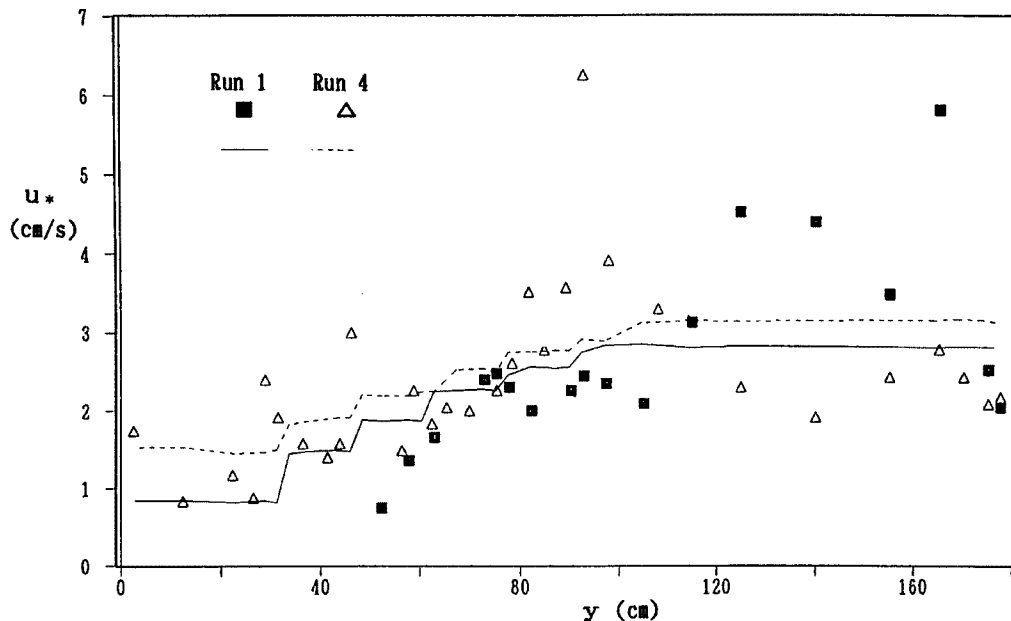


Fig. 12 Bed shear velocity distribution at $x = 9$ m evaluated by logarithmic law (symbols) and those calculated with local depth and bed slope (lines) in run 1 and 4.

のように、路床部の高速域が護岸域の上方にまで及んでおり、左側壁近傍の $y = 2.5$ cm でも 30 cm/sec に近いかなりの流速がある。しかし、50 cm/sec の等流速線に明確に現れているように、捨て石近傍の流速は左横の護岸域低部の流速よりもかなり小さくなっており、ここでも、このような捨て石が大きな粗度要素として働き、周辺の流れを著しく減速させる効果をもつことが改めて認識される。しかし、既述のように、路床全体には顕著な変化は生じていないが、個々の丸石の周辺では、路床砂がかなり洗掘されている箇所があって、その結果、当初の位置からはっきりとずれている捨て石模型も散見された。一方、護岸模型上では、下部ほど礫の露出が明瞭になっており、周囲の粗砂の流送が推定されたが、礫自体の移動は皆無のようであった。

これらの特徴、あるいは、Run 4 における断面流速分布の下方半分のパターンは Run 3 のものとよく似ていて、小水深の実験結果から大水深の場合の流れ特性を類推することがある程度可能であることが判る。

(e) 実験結果の検討

各実験について、水位・路床測定結果に基づいて平均水理量の算定を試みたが、水路長に比して路床勾配が $1/2000$ と小さく、一方、既述のようにかなりの水面変動が存在したために、エネルギー勾配が負となることなど、水理量算定の上で困難な点が多く、現時点では評価を加えることができなかった。そこで、水深の大きかった Run 1 と Run 4 について、各測線における流速測定値に基づいて片対数紙上で速度勾配を求め、カルマン定数を 0.4 として摩擦速度を評価した。Run 1 のように流速変動がかなり顕著であった場合でも、平均流速は片対数紙上に直線的に並ぶことが多く、その流速勾配から摩擦速度を評価することは比較的容易であった。結果を局所水深と路床勾配から算定される摩擦速度と比較して示せば Fig. 12 のようである。

速度勾配から評価された摩擦速度は、流路形状を反映している局所水深から算定されたものに比してばらつきが大きく、特定の傾向は見出しにくい。しかしながら、Run 1 および 4 の両方とも、局所的に摩擦速度が限界摩擦速度を越えていたことが示されていて、実験の観察結果と一致しており、同時に護岸域では水深がある程度あると、個々の隅角部に向かって摩擦速度が増加する傾向が認められ、隅角部に向かう二次流の効果と対応している。また、Run 4 では、根固め捨て石の模型付近において摩擦速度には顕著なピーク

が存在していて、捨て石模型の上部で流れが強いせん断を受けていることが判る。捨て石模型に接近する流体の速度は低下しているので、捨て石模型上流側に直接作用する流体力は減少していることになる。しかし、それに作用する全流体力は、単純にいうと前面と背後における圧力の差であるので、Fig. 12のように評価した掃流力と低部流速のどちらが捨て石に実際に作用する力の指標として有効であるかを明確にするためにはさらに詳細な測定が必要である。

4. あとがき

全国各地の多くの河川で進められている多自然型川づくりについて、そのうちで最も一般的であり、かつ、施工延長が長いだけに重要な構造物である多自然型護岸を取り上げ、その合理的な設計指針の確立を目的として詳細な実験を行い、その防災機能を初めとする水利機能について考察を加えることを試みた。すなわち、はじめに、いくつかの実例を示して、どのような型式のものを対象に力学的な検討を進めることが重要であるかについて考察を加えた。ついで、詰め杭と栗石を併用した階段型の緩傾斜護岸を対象として水利基礎実験を準備し、参照実験を含めて4例の実験を行った。しかしながら、当初問題点の整理に手間どり、実験規模と方法を定めえなかったために、装置準備が遅れ、結果的に十分に実験を遂行することが不可能となって、実験に限っても現象の定量的な扱いは端緒についたばかりの状況に留った。

したがって、現段階での結果は不満足なものではあるが、以下にまとめるように、多自然型護岸が抱えている問題点はかなり整理しえ、実験的な取り扱いの方向は見出せたと判断している。

1) 護岸は河川環境に与える影響が大きいだけに、各地で種々の多自然型の工種が実地に検討されている。その共通した特徴は、できるだけ天然素材を用い、状況が許す限り緩傾斜の多孔性・屈撓性に富んだ構造として、コンクリートの使用は極力避けられている点である。

2) このため、使用実績のあるコンクリート・ブロック護岸に比して、より自然な材料を用いたもののほど出水に対する強度と耐久性に不安が残されており、その力学的な評価を進めることが希求されている。

3) 外形が類似の護岸に働く流体力には差異が少ないと判断されるので、過去に水利特性があまり検討されておらず、かつ、破壊過程が容易に観察できるやや弱い構造の護岸を実験対象とし、平均勾配5割、高さ3m、幅約20m詰め杭と栗石による階段状護岸を取り上げた。

4) この護岸の1/20の詳細模型と簡易模型を作成し、栗石と根固め捨て石をそれぞれ直径約10mmの礫と直径約50mmの丸石で模擬した水利基礎実験を行った。

5) 流速の横断面分布から、護岸の段が低くなり水深が増加するとともに流速が急増することや、個々の段差部に複断面水路と類似の二次流が存在し、掃流力分布に影響していることが認められた。また、捨て石部周辺では流速が著しく低下していて、捨て石が流れを減速することは明確であったが、流速には独自の周期変動が生じており、また、周囲の路床がかなりの洗掘傾向を示していて、その維持管理には困難の生じることが予想された。

今後は、各実験についてエネルギー勾配を正しく評価して平均水量を算定し、多自然型護岸に働く平均的な流体力を見積もる予定である。同時に、護岸周辺の流れの測定結果をより詳細に考察して、流れの機構の定量化を図りたい。ついで、直線流路でも護岸上部の礫が移動する条件での実験を進め、流れの機構と土砂の移動性を考慮して、多自然型護岸の破壊機構の解明と防災能力の評価に努め、こうした構造の護岸の適用限界を見出していきたい。

最後に、本研究は、平成4、5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：京都大学防災研究所村本嘉雄教授）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関係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―，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季研修会講義集 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，pp.1-32.
- 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，1993.
- 7) (社)全国防災協会・(社)日本河川協会：蛇籠の知識，1963，166p.