

枠型透過水制の水理機能について

岩佐 義朗・今本 博健・名合 宏之

HYDRAULIC PERFORMANCE OF GROYNES OF LATTICE-TYPE IN OPEN CHANNEL FLOWS

By Yoshiaki IWASA, Hirotake IMAMOTO and Hiroshi NAGO

Synopsis

This paper deals with experimental investigations of the hydraulic performance of groynes of lattice-type settled in open channel flows. Experiments were made in laboratory flumes, under two flow conditions of fixed and movable beds.

Experimental results obtained are summarized as follows : 1) the direction of flow is controlled by groynes in such a way that the approaching flow is partly concentrated in the central core of flow from the upstream side of groyne, which is examined by observing the flow pattern on the free surface through the flow visualization technique used with saw-dust tracer, 2) the velocity measurement using a hot-film flowmeter of constant-temperature operation shows that the longitudinal component of mean or turbulent velocities changes extremely near the groyne, 3) it should be noticed that extensive movements of the groyne, which settled over the movable bed, will probably occur due to sand transportations.

1. は じ め に

水制は水流の局所的な水理挙動を積極的に制御するための工作物である。すなわち、河川における偏流の防止、流路の固定、堤防周辺における流速の減殺ならびに土砂沈澱の誘致、あるいは導流などを目的として、各種の形式の水制が古くより考案・実施されてきているが¹⁾、構造上の見地より水制を分類すると透過水制と不透過水制とに大別される。

この研究で対象とする透過水制は、杭工、枠工、柵工などのように、主として各部材による流速減殺を目的としたものであって、水流の一部を透過させるため、流れより受ける抗力は不透過水制に比し小さく、その維持が比較的容易である。一方、不透過水制は、土出し、石出しなどのように、主として水刳ねによる流向制御を目的としたものであって、水衝部の固定あるいは導流などに用いられるが、流水に強く抵抗するため十分な強度と重量が要求される。現在、各地の河川に使用されている水制の調査結果²⁾によると、不透過の構造のものは、水制高を高くし、流水がその上を越えないようにするか、あるいはケレップ水制のように水制高を低くし越流させることにより流水抵抗が少なくなるようにされたものが多い。前者は主として比較的急流河川で、また後者は緩流河川で使用されてきたが、最近では不透過水制はほとんど使用されず、透過水制が多く用いられる傾向にある。また、不透過水制は単独あるいは少数個の配列で用いられるのに対し、透過水制は数個以上の配列で用いられ、いわゆる水制群としての機能の発揮がはかられている。

水制の計画は護岸計画と密接に係る河道計画の構成要素であり、これらの相互関係を重視しつつ上・下流や対岸への影響を考慮し、河状に応じた動的な計画とされるべきものであるが、その基本としての水制の水理機能、すなわち、流速減殺機能および流向制御機能についての解明が必要とされる。このためには、水制の流水に及ぼす抵抗特性、水制周辺における流れの局所的特性ならびに水制設置に伴う路床の洗掘・堆積特性な

どが検討されなければならないが、これらの特性は、1)水制の構造(透過性、不透過性など)、2)水制の寸法と形状(高さ、長さ、幅および組合せ)、3)水制の配列(設置個数、間隔、角度、左右両岸における水制設置の対称性など)、4)流路特性(路床勾配、河床構成材料、流路の幅あるいは直線性など)、5)水理条件(流量、水深など)、などと複雑に関係しており、水制の水理機能の解明はきわめて困難である。

水制の水理機能を解明する手法としては、一般の水理現象についてと同様に、運動量解析法を中心とした数学的シミュレーションによる方法と原型あるいは模型実験を中心とした物理的シミュレーションによる方法とがあるが⁹⁾、水制が設置された流れの状態、河床の洗掘・堆積過程などを一般的に表現しうる数学的シミュレーションは不可能であるため、物理的シミュレーションに重点を置く必要がある。しかしながら、物理的シミュレーションにも種々の困難が付きまとう。たとえば、原型実験では実験条件の選定に大きな制約をうけるとともに実験精度などに多くの問題が残され、普遍的特性を見出すことはかなり困難である。模型実験の場合、原型実験で困難とされた事項の多くは解決されるものの、原型との間の相似律の確立が重要であり、模型実験によりつねに満足される結果が得られるとは限らない。とくに、本研究で対象とする水制の水理機能についてのような複雑な問題では現象を支配する要素が多く、相似律が十分に満足されるような条件下で実験を遂行することはほとんど不可能であり、また模型実験における普遍的特性を見出すには莫大な実験量が必要とされるため、定性的な結果が得られるに過ぎない場合が多い。

本研究は、いわゆる杵工の一種である透過水制を対象とし、その水理機能の基本的特性を実験的に明らかにしようとしたものであって、固定床水路における実験と移動床水路における実験とから成り立っている。固定床水路における実験では、水制近傍の自由表面上における流況に関するもの、水制域内の流量変化に関するものおよび水制周辺における速度分布に関するものの3種の実験が行なわれ、また、移動床水路における実験では水制周辺における土砂の洗掘・堆積状況についての検討が行なわれている。

2. 固定床水路における実験——水制周辺の流況特性——

水路内に水制が設置されると、水制の流速減殺機能と流向制御機能との効果により、水制周辺の流況は著しく複雑となる。以下においては、固定床水路に設置された杵型透過水制を対象とし、各種の水理条件のもとで flow visualization の手法を用いて自由表面上の流況を写真観測するとともに、分流法を用いて水制域内流量を計測し、さらにホットフィルム流速計を用いて平均および乱れ速度の計測を行なうことにより、水制設置に伴う流況の変化特性について実験的検討を加える。

2.1 実験装置および方法

2.1.1 実験水路および実験水制

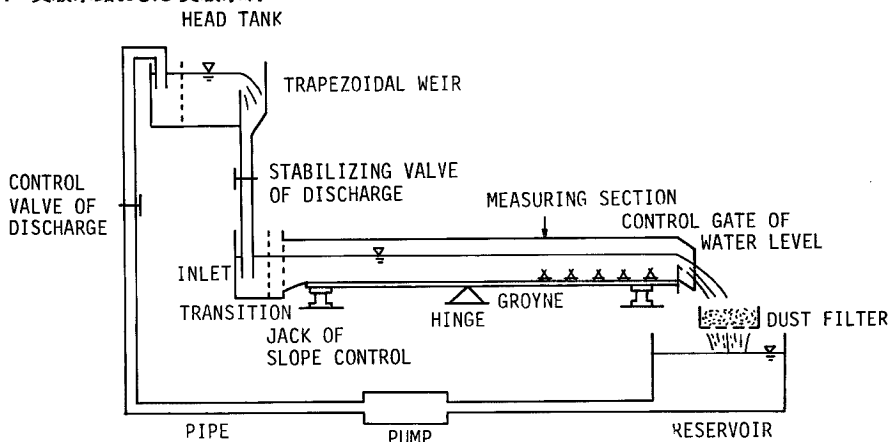


Fig. 1 Experimental channel of fixed bed.

固定床水路に設置された杵型透過水制周辺の流況特性を明らかにするために用いられた実験水路は、Fig. 1 に示されるように、長さ 13m、深さ 20cm、幅 40m の長方形断面を有する循環式滑面直線水路であって、路床勾配は水路の上下流端近くに設けられたジャッキの操作により $\pm 1/20$ の間で任意に変えられるが、本実験においては $1/500$ の一定値に保たれている。また、流量は流量調節用バルブを操作することにより $0 \sim 20 \text{ l/sec}$ の範囲で任意に変化させることができ、流量計測は高水槽内に設けられた台形ゼキによって行なわれる。水深の計測には $1/10 \text{ mm}$ 読みのポイント・ゲージを用い、実験水路の上流端より 8.5m の基本断面近傍の水位は水路下流端に設けられた水位調節用ゲートにより調節されるようになっている。さらに水路下流端には木綿布製の除塵フィルターが設けられ、実験水の清浄性が保持されるよう努められている。

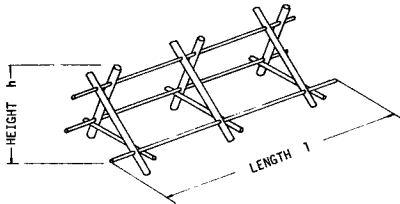


Fig. 2 Model of groyne used in laboratory experiments.

本実験で対象とされた杵型透過水制のモデルは Fig. 2 に示されるような構造であって、いわゆる合掌杵水制と称せられるものに類似しており、実験水路との関係より実験水制の寸法は長さ 10cm、高さ 4cm とされている。

2.1.2 実験方法

本実験では、自由表面上の流況の可視化観測 (flow visualization)、水制域内の流量計測、水制周辺の平均および乱れ速度計測の 3 種の実験が行なわれたが、それぞれの実験方法はつぎの通りである。

1) 自由表面上の流況の可視化観測

Fig. 3 に示めされるように、実験水路の上流端より 8.5m の基準断面より下流側の両側壁に沿って所定個数の実験水制を所定間隔で左右岸対称にかつ側壁より直角に設置し、所定流量の通水を開始して定常状態に達したことを確かめたのち、トレーサーとしての荒挽きおが屑を基準断面より約 3m 上流側の位置よりふるいを用いて自由表面上にできるだけ一様にまき、トレーサーが水制周辺を流下する状況を水制設置部鉛直上方に設置されたカメラ (ニコン製 F 1.2) によって撮影した。なお、撮影部の照明には散乱光による映像コントラストの低下を防ぐため集光スリット照明が用いられ、レンズの絞りは、露出時間 ($1/4 \sim 1/60 \text{ sec}$) およびフィルム感光度 (ASA 100) に応じ、適宜に設定されている。

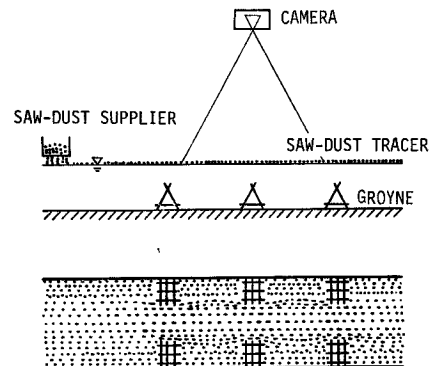


Fig. 3 Flow visualization with saw-dust tracer.

2) 水制域内の流量計測

流水中に水制が設置されると、流れは流心部に迫いやられるとともに、水制域内における流速の減少がみられるようになるが、これらの様相を適確に把握するには水制周辺における速度場の特性の解明が必要である。しかしながら、現象の複雑さより当然のことながら速度場の詳細な特性を実験的に解明するには、多数個の計測点における速度計測が必要とされるうえ、水制周辺における流れは 3 次元的な挙動を示すため、流れ方向、横方向および鉛直方向の 3 速度成分の計測が求められ、多くの困難な点がつきまとうことになる。

このため、本実験においては、水制域内の流水を適当な方法により分流し、その流量を計測することにより水制の流速減殺機能の概略を知ろうとした。すなわち、Fig. 4 に示されるように、水路下流端を基準に上流側に所定個数の水制を所定間隔で左右岸対称に、かつ側壁より直角に設置し、水路下流端において水路側壁より水制先端部までの流水断面を流れる流量を肉厚 1mm の鉄製薄板により分流し、分流後の流量 Q_2 を流量ますで計測することにした。流量ますへの流入時間の計測には電気式 digital counter が用いられたが、このカ

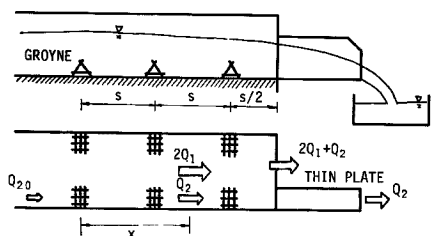


Fig. 4 Schematic figure of flow measurement for main and separated flows.

だけではなく乱れ速度をも計測の対象としたためピトー管による方法は適用されず、室内実験用乱れ計測法として現在もっとも信頼性の高いホットフィルム流速計による方法を用いることにした。

一般に、ホットフィルム流速計は、所定の温度に熱せられたセンサー（ホットフィルムプローブ）より流水に奪われる熱量がセンサーの温度、形状および大きさと流体の速度、温度、圧力、密度、比熱、熱伝導率などによって定まるという事実を利用し、流体の速度以外の量が既知の場合、何らかの方法でセンサーより流水に奪われる熱量を知り流体の速度を求めようとするものである。本実験で用いられた定温度型ホットフィルム流速計（DISA 製 55D 00）は、一定電圧のもとでセンサーを所定の温度に保つために要する電流の強さより、センサーから流水に奪われる熱量を検出しようとするものであって、センサーの寸法は小さく、変動速度に対する応答性にも優れている点で現在もっとも高性能の速度計測器である。

ホットフィルム流速計の使用に際しては、流水中の温度変化ならびに流水中に含まれる微細粒子のプローブへの付着に対する綿密な考慮が必要であるが、本実験においては、前者の影響を検定により補正し、また流水の清浄性の保持に留意するとともに、微細粒子の付着が少ない構造の円錐型プローブ（DISA 製 55R 42型）を使用することにより、後者の影響が無視されるようにした。なお、ホットフィルム流速計の応答特性については 2.1.3 に後述する。

平均および乱れ速度計測においては、実験水路の不整あるいは水路長の有限性に基づく水路流入部および下流部の影響を避けるため、ホットフィルム流速計の設定位置を水路の上流端より 8.5m の基準断面内に保ち、水制設置箇所を基準断面より上・下流側に適宜移動させ、計測点の水制との相対位置も移動されるという方法が用いられた。

ホットフィルム流速計の出力電圧はデータレコーダー（TEAC 製 R400 型）に一旦磁気記録されたのち、再生され、ローパスフィルタ（JEIC 製 UF-8 型）により対象領域外の高周波数成分を除去し、その後 AD 変換器（TEAC 製 DP500 型）により一定時間間隔ごとに数値化され、所定個数のデータが紙テープとして得られるようになっている。このようにして得られたデータは京都大学計算センター（KDC-II）に設けられたコンピューター（HITAC 5020）によって処理され、平均および乱れ速度が計算される。

2.1.3 ホットフィルム流速計の応答特性

既述のように、ホットフィルム流速計は、熱せられたセンサーから流体への放熱量を電氣的に検出することにより、流体速度を計測しようとするものであって、ホットフィルムプローブおよび対象流体が定められるとセンサーからの放熱量に応じた流速計の出力 E はセンサーの温度 T_s と流体の温度 T_w との差 $T (=T_s - T_w)$ と流体の速度 U とによって定まると仮定されている。もちろん、この仮定は流体中に含まれる微細粒子などのプローブへの付着が無視される場合に適用されるものであって、この場合、流体の温度変化の影響はつぎのような検定により定量化される。

定温度作動時におけるセンサーの電気抵抗は、ホットフィルム流速計本体に内蔵された抵抗設定部の抵抗値

ウンターの精度は $1/1,000 \text{ sec}$ である。

この方法には、水制域内の流水を水路下流端で分流していることから知れるように、水制設置部より上流側に関する情報が得られないという欠点とともに、水路下流端での分流により水制域内の流量が正確に知りうるかという問題点が残されるが、水制の流速減殺機能の概略を知るには、その簡便さよりきわめて有効であると考えられる。

3) 平均および乱れ速度計測

開水路流れの速度計測法としては従来より各種の方法が用いられており、室内実験水路における平均速度計測法としてはピトー管による方法がもっとも一般的なものとしてよく知られている。しかしながら、本実験では平均速度だ

に一致するよう電気回路が組み込まれているため、この抵抗設定部の抵抗値を変化させることによりセンサーの抵抗値を任意に設定することができる。すなわち、センサーの電気抵抗値 R と温度 T_s との関係を、Fig. 5 に示されるように、予じめ検定により明らかにしておく、抵抗設定部の操作により任意の T_s の設定が可能となる。したがって、種々の T_s あるいは T_w のもとでの E と U との関係を検定しておく、流水の温度変化の効果がわかることになる。

本実験では、 T_w を一定に保ち、 R すなわち T_s を変化させることにより、種々の T ($=T_s - T_w$) のもとでの E と U との関係を検定したが、その結果を例示したものがFig. 6 である。図よりわかるように一定の U のもとでは、 T が増加するにしたがって E も増加する傾向がみられ、増加量を ΔE とすると ΔE と U との関係は、つぎのように近似される。すなわち、

$$U = f(E, T) = f_0(E_0 - \Delta E, T_0) \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに、 $f_0(E_0, T_0)$ は $T = T_0$ における出力電圧 E_0 と U との関係を表わす関数である。

いま、種々の U のもとでの ΔE と $(T - T_0)$ との関係を示すと Fig. 7 のようになり、 U のきわめて小さな場合、あるいは $(T - T_0)$ がきわめて大きい場合を除くと、 ΔE は $(T - T_0)$ に比例するとみなしうる。すなわち、

$$\Delta E = \alpha(T - T_0) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

ここに、 α は比例定数である。Fig. 6 の関係より α がわかると、(2.2) 式により ΔE が決定されることになる。したがって、 E および T より U を知るには、(2.1) 式に示された関数 $f_0(E_0, T_0)$ を決定すればよいことになる。

円柱プローブについての E_0 と U との関係は、一般に、奇数次の項を省略した4次式、すなわち、

$$E^2 = A + B\sqrt{U} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

によって近似されることが放熱論より導かれる（ここに、 A および B は定数である）。なお円錐型プローブについての広範囲な U にわたる良い近似を得るには、さらに高次の関数近似を行なう必要がある。本実験においては一般の6次式によって近似することにした。すなわち、

$$U = f_0(E_0, T_0) = \sum_{i=0}^6 A_i E_0^i \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

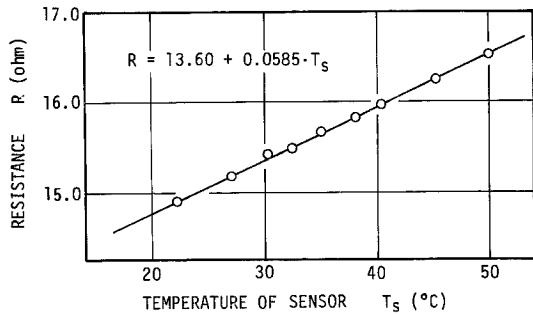


Fig. 5 Calibration of electric resistance R at various temperature T_s of hot-film sensor.

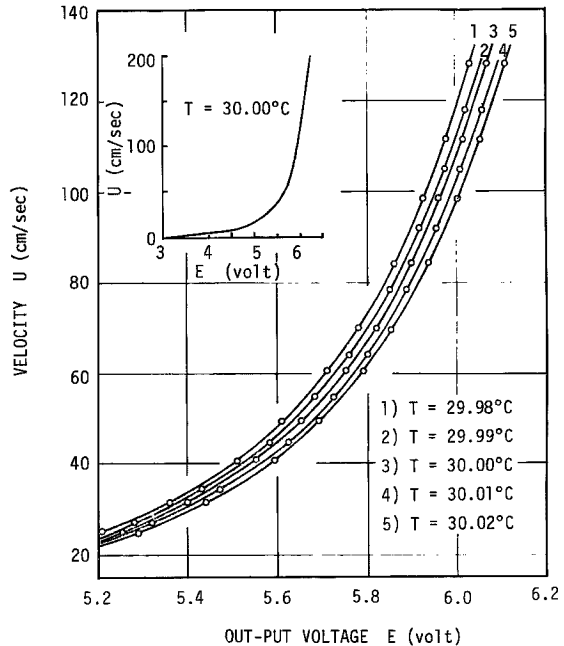


Fig. 6 Relation between out-put voltage E and fluid velocity U at some temperature difference T between hot-film sensor and fluid.

ここに、係数 $A_0, A_1, \dots, A_6$ は定数であって、**Fig. 6** に示された検定曲線より容易に決定される。

(2.2) および (2.4) 式を (2.1) 式に用いると、速度計測時の温度差 T における E と U との関係は

$$U = f(E, T) = \sum A_i \{E - \alpha(T - T_0)\}^i \dots \dots \dots (2.5)$$

と表わされる。

2.2 自由表面上の流況特性

荒挽きのおが屑をトレーサーとした flow visualization 法による自由表面上の流況観測結果の一例として、3種の水利条件下の流れに実験水車を左右岸で対象に1組および5組設置した場合を **Photo. 1** および **2** に示す。ここに示された流況観測時の水利条件

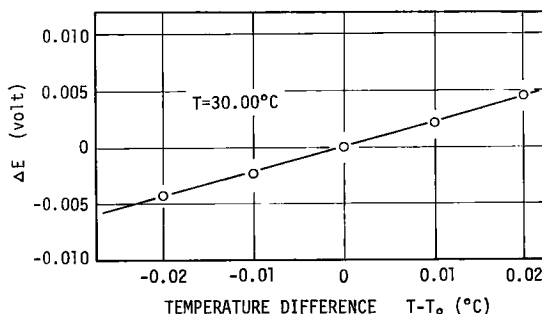


Fig. 7 Drift of out-put voltage ΔE resulted from the variation of temperature difference $(T - T_0)$ at some fluid velocity.

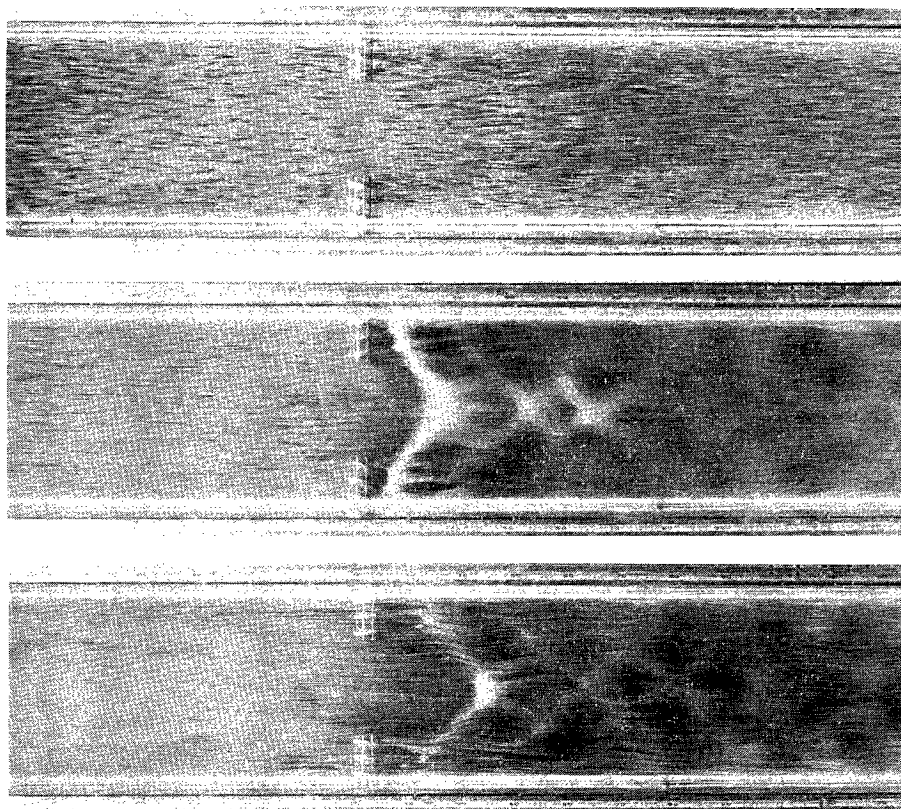


Photo. 1. Flow pattern on the free surface with single pair of groynes.

は **Table 1** に示される通りであって、実験時の Reynolds 数は開水路流れにおける層流から乱流への遷移 Reynolds 数 500~2,000 を上回っており、流れはいずれの場合も乱流状態にあるとみなされる。また水車の設置されない場合の Froude 数はいずれも 1 より小さく常流状態にあるが、流量の大きな Run F-9 お

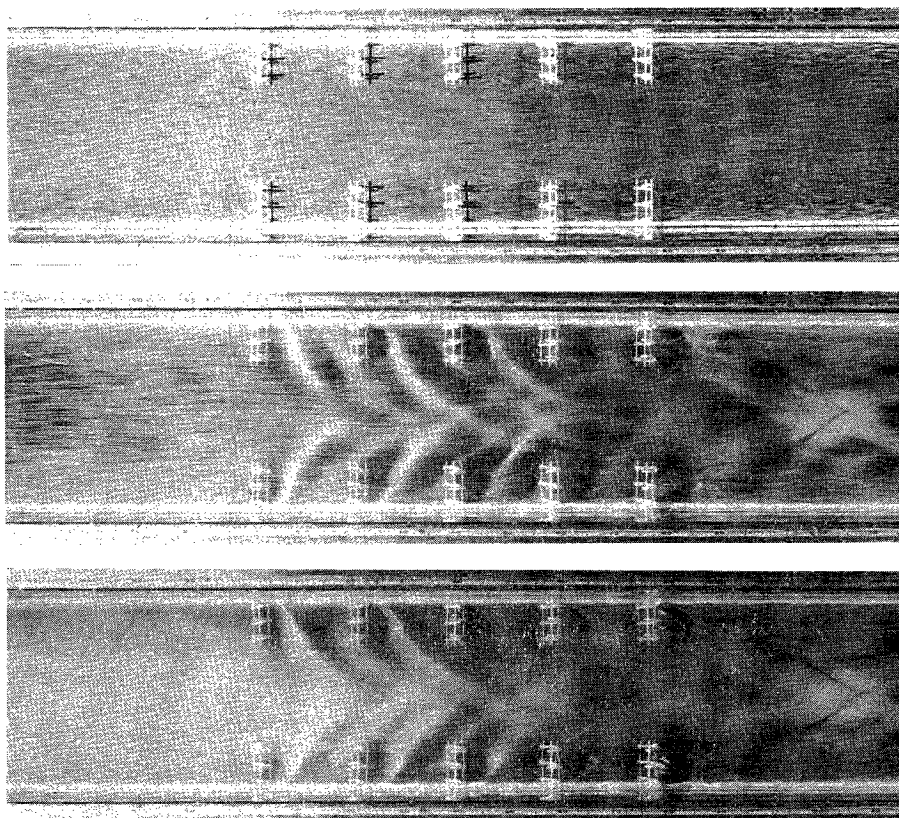


Photo. 2. Flow pattern on the free surface with five pairs of groynes.

Table 1. Hydraulic Conditions

Run	$Q_t(\ell/\text{sec})$	$Q_{20}(\ell/\text{sec})$	$H_0(\text{cm})$	$U_{m0} = Q_t / BH_0$ (cm/sec)	$T(^{\circ}\text{C})$	$\nu(\text{cm}^2/\text{sec})$	$Re = U_{m0}H_0/\nu$	$F_r = U_{m0}/\sqrt{gH_0}$
F-1	0.671	0.162	1.04	16.1	30.8	0.791×10^{-2}	2.12×10^3	0.505
F-2	1.904	0.455	1.90	25.1	30.8	0.791×10^{-2}	6.02×10^3	0.581
F-3	3.780	0.881	2.90	32.6	30.8	0.791×10^{-2}	1.19×10^4	0.611
F-4	5.124	1.168	3.47	36.9	30.9	0.790×10^{-2}	1.62×10^4	0.633
F-5	6.893	1.530	4.09	42.1	29.8	0.808×10^{-2}	2.13×10^4	0.666
F-6	8.714	1.900	4.66	46.7	31.0	0.788×10^{-2}	2.76×10^4	0.692
F-7	10.184	2.200	5.05	50.4	31.0	0.788×10^{-2}	3.23×10^4	0.717
F-8	11.064	2.379	5.29	52.3	30.2	0.801×10^{-2}	3.45×10^4	0.726
F-9	12.501	2.650	5.58	56.0	29.8	0.808×10^{-2}	3.87×10^4	0.757
F-10	14.210	2.984	5.91	60.1	30.4	0.798×10^{-2}	4.45×10^4	0.790

よび F-10 では、水制よりやや下流側で局部的に射流状態となっている可能性がある。

ここに示された写真の撮影条件はいずれも露出時間 1/8 sec, 絞り 4 であり、左側が上流側、右側が下流側である。

写真において、中央部に白く写っているのが長さ 10cm, 高さ 4cm の実験水制であり、白い線条のすじは

自由表面上を流下するトレーサーの痕跡線を表わす。定常状態の層流では、痕跡線と流線とが一致するが、本実験のように乱流状態の流れでは、平均的に定常流として取り扱われる場合でも、痕跡線と流線とが一致するとは限らず、痕跡線より流線を知るには数多くの繰り返し観測が必要となる。しかしながら、概略的な流れの様相を知ろうとする場合には、痕跡線より流線の概略がわかるとしてもよい。以下においては、痕跡線の観測結果より流況の特性を推定することにする。

まず、1組の水制が設置された場合を示す **Photo. 1** について検討する。**Photo. 1** には3種の水利条件での観測結果が示されているが、水制が設置されない場合の水深 H は、それぞれ **a)** $H_0=1.90\text{cm}$ (F-2), **b)** $H_0=4.09\text{cm}$ (F-5), **c)** $H_0=5.58\text{cm}$ (F-9) である。**a)** の場合、流れの水深は水制の高さの約半分であり、流速も小さく、流れは水制に近づくにしたがって徐々に流心側に押しやられ、水制を過ぎてある距離だけ流下したのち元の状態に復している。また、**b)** および **c)** の場合には、水制下流部に顕著な表面波の発生が見られ、表面波の発生位置は、水深および流速が大きくなるにしたがって下流側に移行している。なお、**b)** では顕著な表面波の砕けが見られるが、これは水深と水制の高さがほぼ等しいことにより、自由表面上における水制による擾乱が大きくなることを示すものと考えられる。一方、**c)** では水深が水制の高さを越えるため、水制下流部に若干の砕波が見られるのみで、水制による擾乱が水面下に潜り、自由表面上の流れは、一見、滑らかに流れているように見える。

以上より、水制近傍の流況としてつぎのことがわかる。流れは水制に近づくにしたがって流心側に押しやられ、水制上流側において若干の減速が見られる。一方水制を透過した流れは一旦加速されたのち徐々に減速され、水制のない場合の流速に近づく。水制近傍における加速は主として水制直下流の水位低下に伴う流水断面の減少に基づくものであって、路床面の形状によっては、たとえば後述の移動床の場合のように洗掘による流水断面の増加があるような場合には、加速の度合いは小さくなると考えられる。

なお、水制先端部における流線の曲りは、**a)** の場合、 $10\sim 11^\circ$ 程度であり、自由噴流における噴流角度⁵⁾ときわめて類似した値である。

また、5組の水制が一定間隔で設置された場合を示す **Photo. 2** によると、この場合は1組の場合に比し、水制設置の効果がさらに顕著となり、水制設置による流況変化領域が上・下流に広げられることがみられる。

2.3 水制域内の流量特性

水制の流速減殺機能の概略を把握するため、**Fig. 4** に示されたように、実験水制を5組だけ s という等間隔にかつ最下流側の水制から水路下流端までの距離が $s/2$ となるように設置し、水路下流端で水路側壁から水制先端までの断面内の流水を分流し、その流量 Q_2 を流量ますにより計測する方法を採用した。なお、実験は **Table. 1** に示された10種の水利条件のもとで行なわれている。

Fig. 8 は実験結果の一例として、 Q_2 と水路全体を流れる流量 Q_t との関係を水制間隔 $s=5, 10, 40$ および 80cm のものについて示したものであるが、水制が設置されない場合の側壁から水制先端に相当する断面内の流量 Q_{20} 、およびそのときの水深 H_0 が併示されている。この図にみられるように、 Q_t が増加するに伴って一般に Q_2 も増加するが、その増加特性は s によって異なり、たとえば $s=40\text{cm}$ の場合と $s=80\text{cm}$ の場合とを比較すると、 Q_t が小さな領域では前者に対する Q_2 は後者のそれより小さいが、 Q_t が大きく水制高より水深が大きくなるような領域では逆に前者に対する Q_2 の方が大きくなっている。このような特性は水制設置の流体に及ぼす抵抗特性が水制間隔のみでなく水利条件によって変化するためと考えられ、水制の水利機能解明の困難さを示すものといえよう。

水制の流速減殺機能をより明確に評価するため、無水制時の水制域内流量が水制設置に伴いどの程度減少されるかを示す流量減少率 $\Delta Q_*(Q_{20}-Q_2)/Q_{20}$ と水制間隔 s との関係を水利条件ごとに示すと **Fig. 9** のようになる。図より明らかなように、流量が一定の場合、 s の小さなものほど ΔQ_* は大きく、 s が大きくなるにしたがって減少する傾向があるが、減少のしかたは一様でなく s のある値付近で極大値を示す。また ΔQ_* が極大となる s の値は流量の大きなものほど大きくなる傾向がみられる。ただし、極大値の存在は無水制時

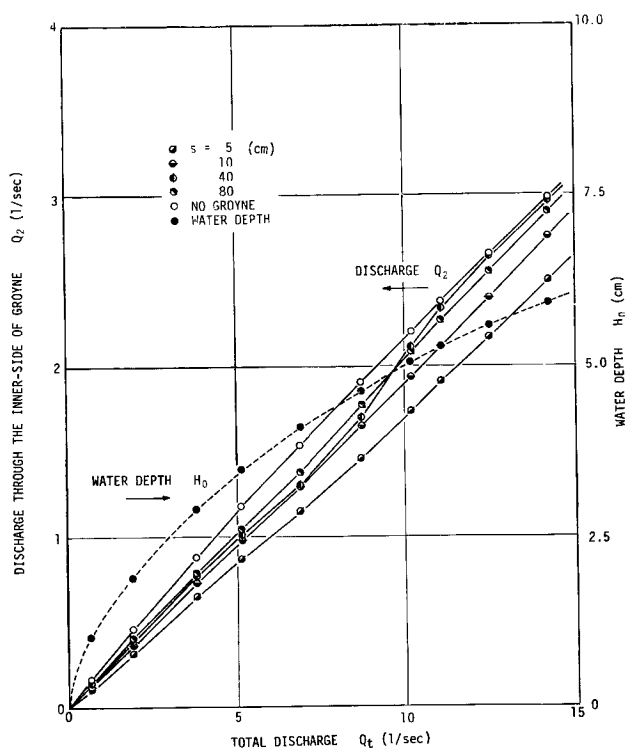


Fig. 8 Relation between the discharge Q_2 of groyne region and the total discharge Q_t at some spacing of groynes s .

の水深 H_0 が水制高 h にほぼ等しい場合には顕著に認められるが、流量がきわめて小さいかあるいはきわめて大きくなって H_0 と h との差が大きい場合、極大値の存在は不明瞭となる。このような極大値の発生は上・下流側の水制相互間の干渉効果による抵抗の極大を意味するものであり、すでに杵型粗度に関する研究^{6),7)}あるいは不透過水制に関する研究⁸⁾などにおいても確かめられている。なお、Fig. 9 に示された流量の大きな場合の極大値発生時の水制間隔 s はほぼ 40cm となっており、水制高 $h=4\text{cm}$ と比較すると、 $s/h \approx 10$ となる。この値は、従来における杵型粗度などの研究で見出された値と一致するが、水深が水制高より小さな場合、抵抗特性を支配する要素として水制高を挙げることはできず、本実験で用いた水制の構造より定まる他の要素、たとえば、水制を構成する部材の直径、部材間の間隔などに支配されると考えるのがより妥当であり、このような一致性は偶然的とみなすべきであろう。また、流量が大きく水深が水制高より大きくなる場合、水制高は抵抗特性を支配する要素となるが、極大値発生時の水制間隔が流量の増加に伴い大きくなるという事実は、水制高以外の種々の支配要素の存在を示すものであり、水制設置に伴う流況変化の複雑性が理解される。一方、水制間隔 s が一定の場合における ΔQ_* と Q_{20} との関係についてみると、Fig. 10 に示されるように、 Q_{20} が増加するにしたがって ΔQ_* は一般に減少することが知れる。また、 $s=40\text{cm}$ 程度の水制間隔の場合、 ΔQ_* は Q_{20} のある値付近で極大値を示し、極大値発生時の Q_{20} は s が大きくなるにしたがって減少するとともに、極大値の大きさも減少する傾向がみられるが、現時点ではこのような特性を適確に説明することは困難である。

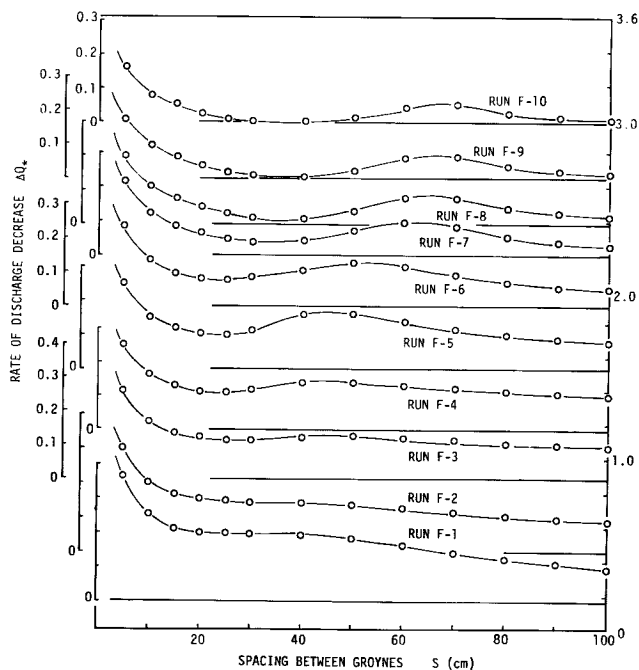


Fig. 9 Relation between the rate of discharge decrease ΔQ_* and the spacing of groynes s .

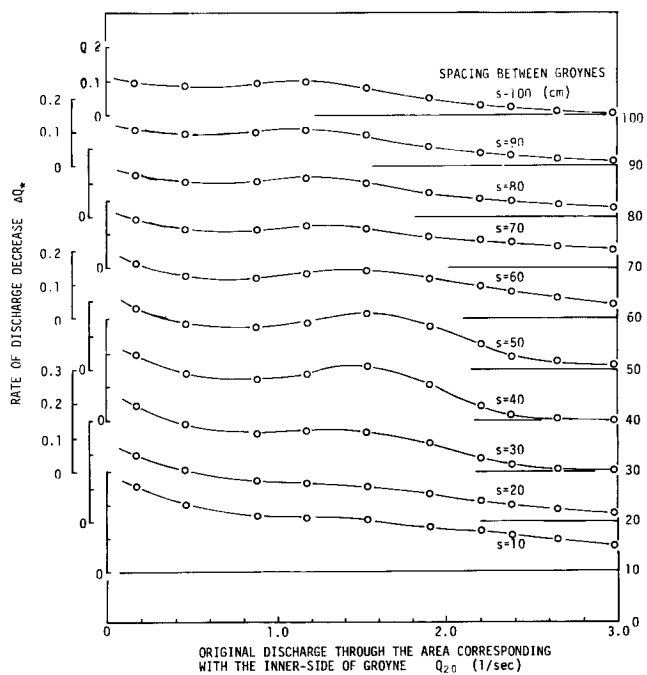


Fig. 10 Relation between the rate of discharge decrease ΔQ_* and the original discharge Q_{20} .

2.4 平均および乱れ速度分布

2.4.1 単独水制周辺の速度分布特性

本実験においては、水制周辺の速度分布特性を明らかにするため、定温度型ホットフィルム流速計による速度計測を行なったが、計測結果の一例として **Table. 1** に示された Run F-2 の水理条件のもとで一組の水制を設置した場合の流れ方向の平均および乱れ速度分布を示すと **Fig. 11** のようである。ただし、計測点の路床面からの高さ z は半水深すなわち $z=1\text{cm}$ に保たれている。

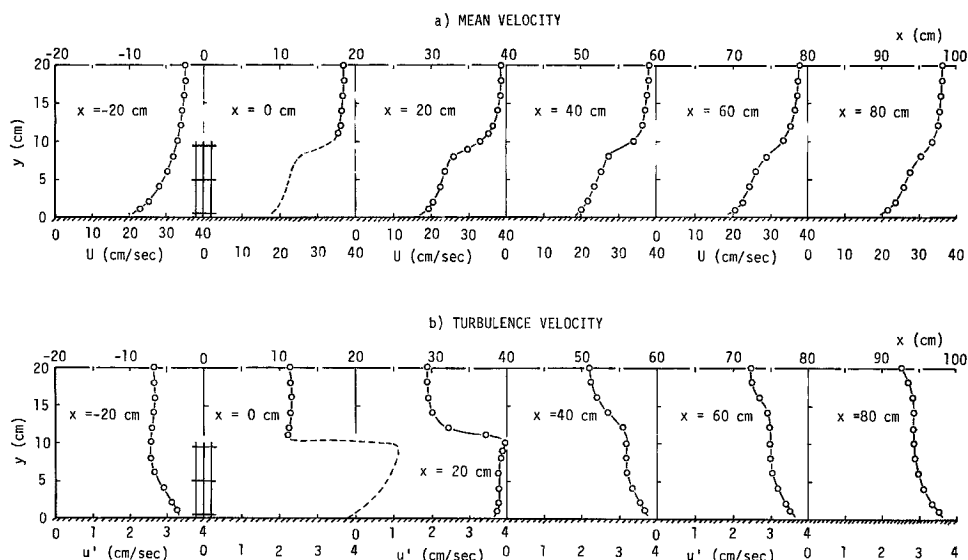


Fig. 11 Distribution of mean and turbulent velocities near a single pair of groynes.

Fig. 11(a) は平均速度 U の水路横断方向分布を示したものであり、水制より上流側では、側壁面より水路中央部に向かって平均速度が滑らかに増加しているが、水制より下流側での平均速度は水制域内で減少するとともに水制域外すなわち水路中央部で若干増加している。もちろん、このような水制設置に伴う流速の変化は水制から下流にすすむにしたがって小さくなり、水制が設置されない場合の状態に漸近していく。また、水制域内における平均速度の減少により、その横断方向分布に凹部がみられるようになるが、凹部の発生個所は水制より下流側に離れるにしたがって側壁側に移動するとともに凹部の度合いは小さくなり、水制より十分離れたところで消えてしまう。

また、**Fig. 11(b)** に示めされた乱れ速度 u' の横断方向分布によると、水制より上流側で側壁面近傍から水路中央部に向かってほぼ一様に u' は減少するが、水制より下流側では水制後流域の擾乱効果により水制域内の u' が増加され、とくにその増加は水制先端近傍で著しく、 u' の横断方向分布には U 分布の場合とは逆に凸部がみられるようになる。このような凸部の度合いは水制より下流側に離れるにしたがって小さくなるが、その発生個所は水路中央部側に移動していく。

以上に述べた流速計測結果により、透過水制における流れの内部構造はつぎのようであることがわかる。すなわち、一様な開水路流れに透過水制が設置された場合、水制後流域の平均速度は減少されるとともに（流速減殺機能）、水刳ねにより流水の一部は水路中央部へ押しやられ中央部での平均速度は増加させられる（流向制御機能）。また、水制より下流側に離れるにしたがって、流体の混合現象に伴う水制域外からの運動量補給により水制域内における平均速度の回復がみられるとともに、乱れエネルギーは水制域外へ拡散しつつ流体の

粘性効果により逸散されることになる。

2.4.2 水制群の水理機能

すでに 1. において述べたように、透過水制は、本来、流れを徐々に制御しようとするものであって、これが単独に用いられることは少なく、数個以上が設置されたいわゆる水制群としての機能の発揮が要求される場合が多い。このため、以下においては、設置個数を変化させた場合の水深、平均速度および乱れ速度の流れ方向分布について検討することにする。なお、1.4.1 の場合と同様に計測は Run F-2 の流れを対象とし、計測点は路床面からの高さ z を 1cm にとるとともに、流れ方向は上・下流測の水制間隔 ($s=40\text{cm}$) と同じ間隔ごとに選ばれている。また、横断方向には水路中央部と水制域中央部の両断面が選ばれている。

Fig. 12 は水路中央部 ($y=20\text{cm}$) における水面形の計測結果を示したものであって、縦軸には水制が設置

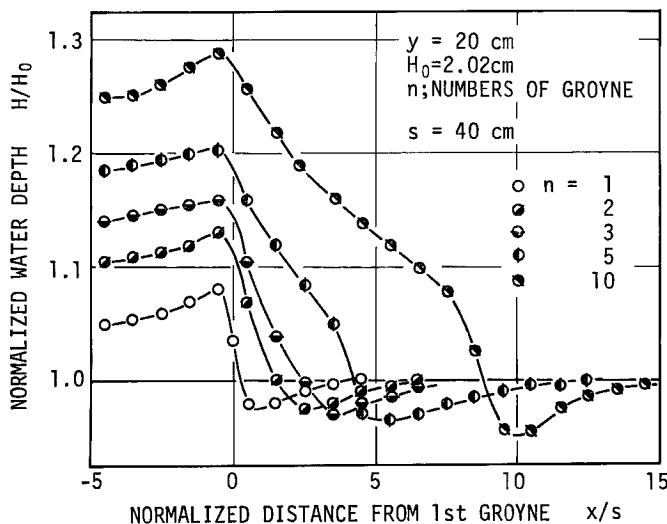


Fig. 12 Longitudinal variation of water depth for various pairs of groynes.

された場合の水深 H と無水制時の水深 H_0 との比 H/H_0 が、また横軸には最上流側の水制を基準に下流側に測られた距離 x と水制間隔 s との比 x/s が選ばれている。なお、単一組の水制設置の場合については水制間隔を無限大として取り扱う必要があるが、複数組の場合との比較のため後者の水制間隔による距離の無次元化が行われている。Fig. 12 によると、水制設置に伴い水路中央部で測られた水面形は水制より上流側ではせき上げ背水となるが、水制設置区間では流下距離の増加に伴い水深は徐々に減少され、最下流側水制の上流付近で急減し無水制時の水深より浅くなったのち、水制設置区間より離れるにしたがって回復されることが知れる。以上は水

深計測点を粗く選んだ場合の結果であって、水制にきわめて接近した局所的な領域では、渦の離脱などにより水深は不安定に変動している。なお、本実験では水制近傍の不安定領域を除き、横断方向の水面勾配はほとんどみられず、概略的な水面形の特徴は水路中央部におけるものによって代表されると考えて差し支えない。

つぎに、平均速度の流れ方向分布について検討する。Fig. 13 は、水路中央部 ($y=20\text{cm}$) および水制中央部 ($y=5\text{cm}$) における平均速度 U の流れ方向の分布を示したものであって、 U は無水制時におけるそれぞれの計測点での平均速度 U_0 により無次元化されている。水路中央部における計測結果を示した Fig. 13(a) によると、水制設置部より上流側では水制設置部に近づくにしたがって U/U_0 はせき上げ効果により一旦減少するが、水制域設置区間では逆に流下距離の増加にしたがって増加し、水制設置区間の最下流付近で極大値を示したのち流下距離の増加に伴って徐々に減少し 1 に近づいている。また、水制域中央部における計測結果を示した Fig. 13(b) によると、水制設置部より上流側では水路中央部における場合と同様に、水制設置部に近づくにしたがって U/U_0 は減少するが、水制設置区間内においても水制の流速減殺機能により U/U_0 の減少は持続され、水制設置区間より下流側で平均速度の回復がみられるようになっている。

つぎに、乱れ速度 u' の流れ方向の分布について検討する。Fig. 14(a), (b) はいずれも無水制時の乱れ速

度 u'_0 との比 u'/u'_0 の流れ方向分布を示したものであるが、これよりつぎの事項がわかる。すなわち、水路中央部での u'/u'_0 の流れ方向分布には、Fig. 14(a) に示されるように、増加領域および減少領域が2種認められ、極大値が2個、極小値が1個存在している。2個の極大値のうちの最初のもは最上流水制設置断面よりやや上流側で発生し、残りのものは最下流側水制設置断面よりさらに水制間隔の2～3倍だけ下流側に下った断面で発生している。また、極小値の発生箇所は最上流側水制設置断面とそれにつづく水制設置断面との中間となっている。ただし、水制設置区間より下流側に認められる極大値の発生箇所については、単一組の水制設置の場合でも水制設置断面より80～120 cm 下流側となっており、水制間隔よりむしろ水制高などに支配されている可能性がある。

乱れエネルギー式の示すところによると、乱れエネルギーは平均速度の増加領域では減少し、減少領域では増加するという一般的傾向が導かれる⁹⁾。Fig. 14(a) に示された乱れ速度の流れ方向分布のうち、水制設置区間より上流側における乱れ速度の増加領域およびそれに続く上流側水制設置断面近傍における乱れ速度の急減領域は

この傾向に一致するものである。しかしながら、残りの乱れ速度の増加・減少領域は平均速度の減少・増加領域とは必ずしも一致しておらず、水制設置に伴う局所的効果の卓越性が予想される。すなわち、最上流側水制設置断面よりやや下流側に始まる乱れ速度の増加領域は水制後流域からの乱れエネルギーの輸送および自由表面の不安定性にみられるような新たな乱れエネルギーの発生などによるものと考えられ、また最下流側水制設置断面よりさらに水制間隔の2～3倍だけ下流側の断面より始まる乱れ速度の減少は流体の粘性の効果による乱れエネルギー逸散によるものと考えられる。

Fig. 14(b) に示されるように、水制中央部の乱れ速度の流れ方向の分布についても水路中央部と類似した傾向が認められるが、極小値および水制設置区間より下流側に発生する極大値発生断面は、水路中央部におけるものと異なり、かなり下流側に移動していることがみられる。このような極値の発生断面の移動は平均速度

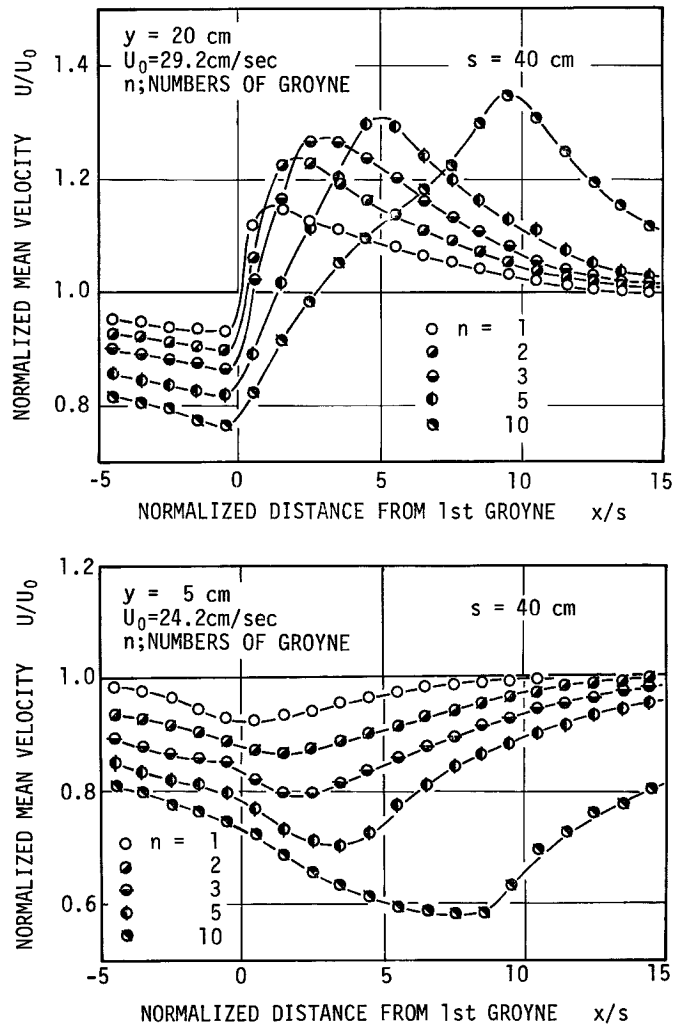


Fig. 13 Longitudinal variation of mean velocity for various pairs of groynes, measured at (a) $y=20$ cm and (b) $y=5$ cm.

分布形状の差異によるものと思われるが、詳細についてはさらに検討を要する。

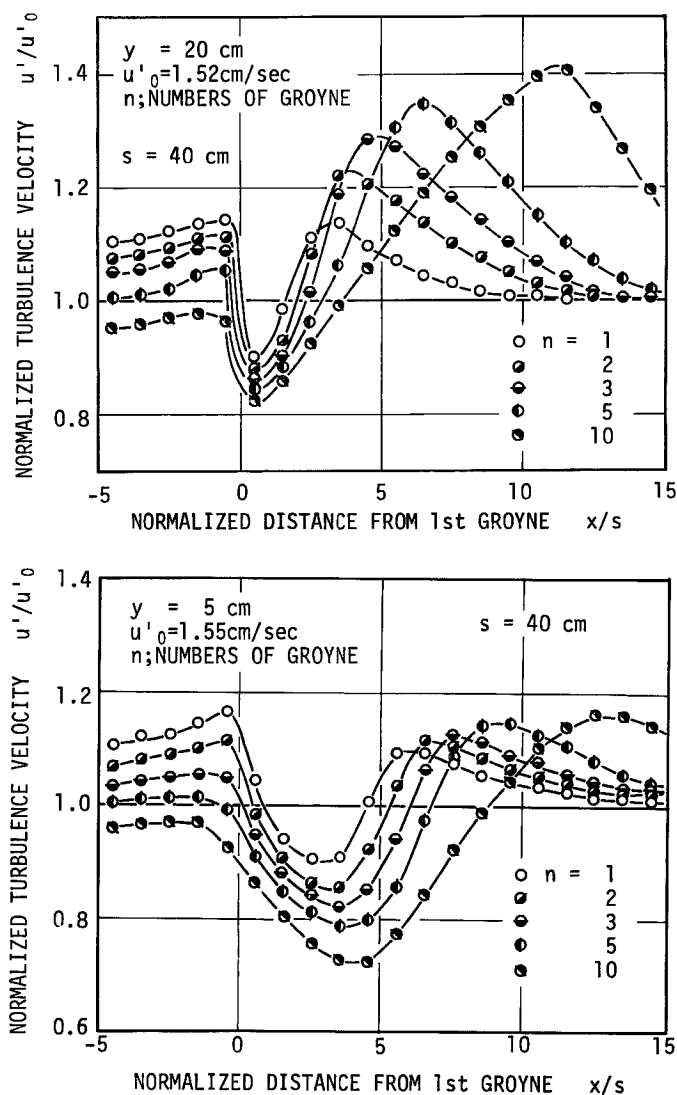


Fig. 14 Longitudinal variation of turbulent velocity for various pairs of groynes, measured at (a) $y=20$ cm and (b) $y=5$ cm.

3. 移動床水路における実験——水制による洗掘・堆積について——

3.1 実験装置および方法

実験水路は、長さ 21m、深さ 0.6m、水路幅 1.0m の長方形断面をもつコンクリート製の長方形断面の循環式直線水路であって、路床こう配はスクレーパーにより 0~1/50 の間で任意に設定できるようになっている。本実験に用いた実験水制は、形状については Fig. 2 に示された固定床での実験に用いられたものと相似であ

るが、寸法については3倍および6倍、すなわち、長さ $l=30$ および 60cm 、高さ $h=12$ および 24cm の2種類である。

実験の手順はつぎの通りである。すなわち、まず、スクレーパーにより路面を整正したのち、単一個の実験水制を水路右岸に接して直角に設置し、通水開始後、数種の経過時間ごとに流水を一旦中止し、水制近傍における路床面の概略を目視観測するとともに、ポイントゲージを用いて路床面の高さを計測し、通水前との比較より洗掘あるいは堆積量が知れるようになっている。なお、水制近傍における洗掘・堆積の状況については水路鉛直上方向ならびに横方向からの写真観測が併用されている。

路床砂としては平均粒径 0.42mm および 0.83mm の一様砂を用いたが、一部の実験については、これらに平均粒径 5mm の砂が少量まぜられた混合砂が用いられている。

なお、実験は4種の水理条件のもとで行なわれたが、それぞれの水理条件は **Table 2** に示される通りである。

Table 2. Hydraulic conditions used in experimentations (movable bed).

Run	$Q(\ell/\text{sec})$	$H(\text{cm})$	$U_m = Q/BH(\text{cm}/\text{sec})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\nu(\text{cm}^2/\text{sec})$	$R_g = U_m H/\nu$	$F_r = U_m/\sqrt{gH}$
M-1	3.8	1.5	25.3	12.5	1.220×10^{-2}	3.11×10^3	0.660
M-2	8.9	3.0	29.7	12.5	1.220×10^{-2}	7.30×10^3	0.548
M-3	16.0	4.8	33.3	12.5	1.220×10^{-2}	1.31×10^4	0.480
M-4	23.5	6.5	36.2	12.5	1.220×10^{-2}	1.93×10^4	0.454

4.2 実験結果および考察

土砂流送を伴う移動床上の流れは路床形態に大きく支配され、またその路床形態は流水の作用によって決定されるというように、流れと路床形態との間には互いに相互干渉関係が存在する。

本実験においても、実験砂として平均粒径 0.42mm の一様砂を用いた場合、**Table 2** に示されたいずれの実験水理条件においても砂堆の発生がみられた。砂堆は流水に比しはるかに遅い速度でもって下流側へ伝播されるため、水制近傍の洗掘・堆積状況は砂堆位置との関係によりかなり複雑となり、その一般的特性を見出すことは困難である。

たとえば、**Photo. 3** に示された4枚の写真は長さ $l=30\text{cm}$ の水制を右岸より直角に1個設置し、**Table 2** に示された実験ケース M-1、M-2、M-3 および M-4 の水理条件のもとで、それぞれ、長時間通水したのちの水制近傍の路床状況を示したものであるが、水制設置に伴う洗掘・堆積に比し、砂堆による凹凸がより著しいことがみられる。また、これらの写真に共通して見られる現象として、水制前流域における若干の堆積と後流域におけるかなりの堆積現象、ならびに、水制近傍における洗掘現象が指摘される。水制後流域における堆積部の長さは、**Photo. 3** の場合について、それぞれ、約 60cm 、約 90cm 、約 120cm および約 150cm と実験の水理条件によってかなり規則的に変化している。

一方、**Photo. 4** に示された4枚の写真は、それぞれ、**Photo. 3** における水制の側面より見た状況を示したものであるが、これらの写真に見られるように、実験ケース M-1、M-2 および M-3 における水制の傾きはそれほど顕著ではないが、実験ケース M-4 については水制近傍における局所的洗掘が著しく、水制にかなりの傾きが認められる。なお、**Photo. 2** では流れの向きを右向きとした **Photo. 1** に合わせるためネガフィルムが裏焼きされている。

水制近傍における洗掘・堆積状況をより明確に見るため、水制近傍における実験砂を平均粒径 0.83mm の砂に置きかえ、また水制より離れた路床面には平均粒径 5mm の砂を混合して砂礫あるいは砂堆の発生を少なくした実験を **Table 2** における実験ケース M-4 と同じ水理条件のもとで行なった。

この場合における水制近傍の路床面の変化状況を経過時間ごとに示すと **Fig. 15** のようになる。また、平衡状態に達したと考えられる経過時間における路床面の状況を **Fig. 16** に示す。これらの図より明らかなよ

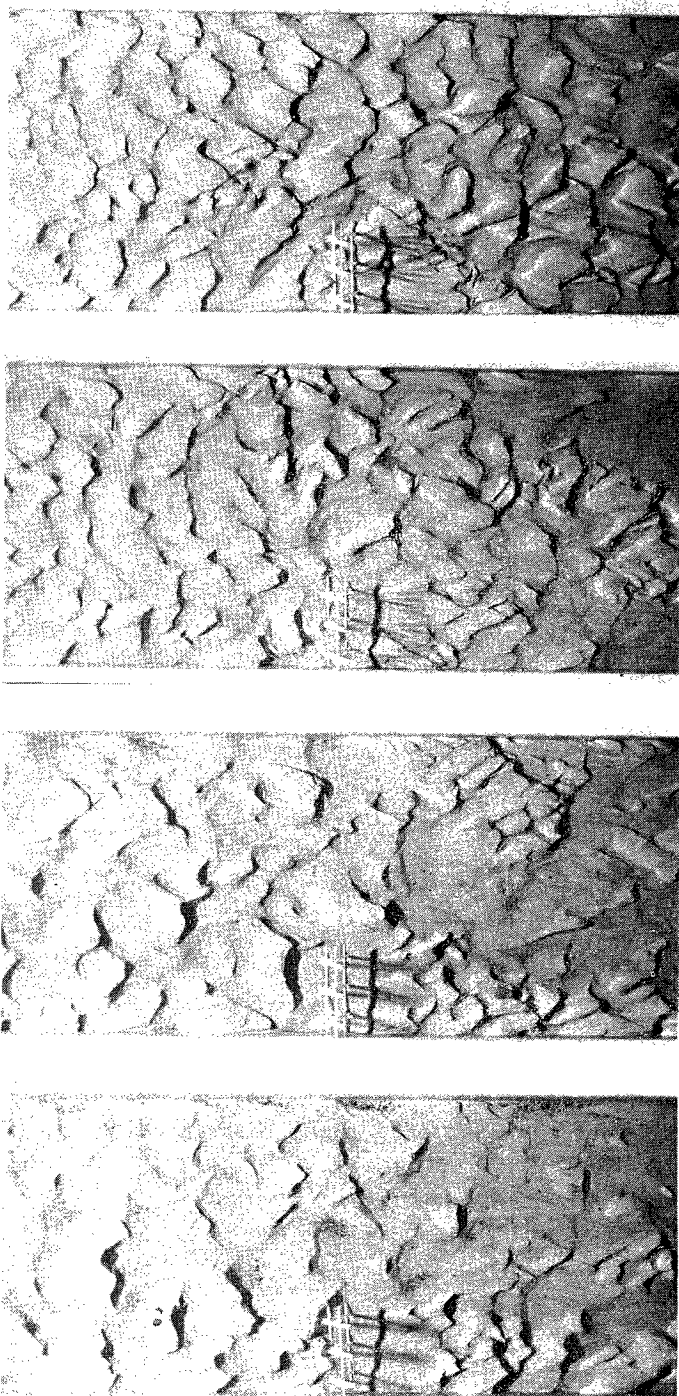


Photo. 3. Plan views of bottom configuration near a groyne.

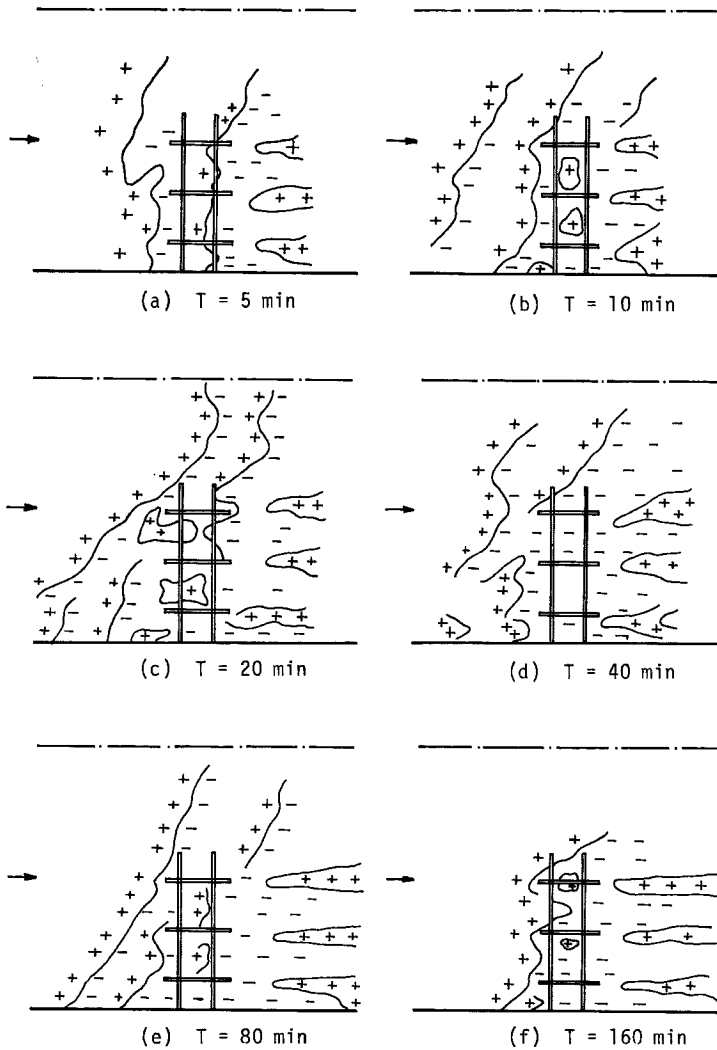


Fig. 15 Temporal variation of bottom configuration near a groyne

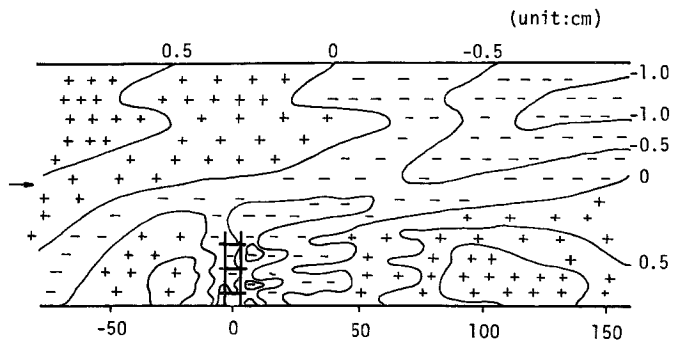


Fig. 16 Final bottom configuration near a groyne.

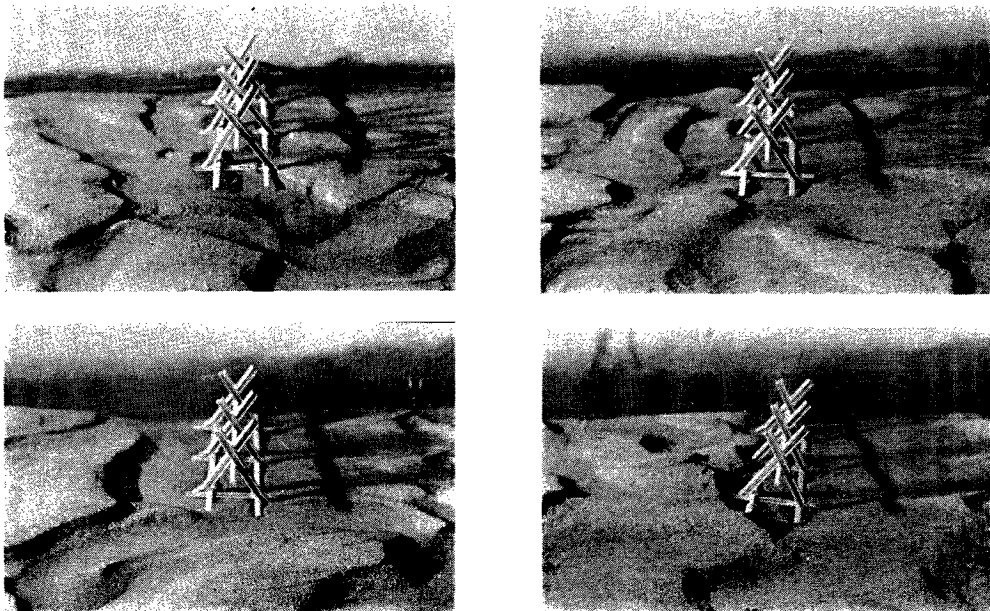


Photo. 4. Side views of bottom configuration near a groyne.

うに、水制近傍における路床の変化状況は経過時間の大きさによって若干異なるが、いずれも、水制前流域には堆積が、水制のまわりには局所的な洗掘が、また、水制後流域には堆積が見られ、砂堆の存在する場合と定性的にはほぼ同様であることが知れる。

また、 $l=60\text{cm}$ の実験水制を用いた場合については、水路幅の有限性の効果がより顕著に現われるが、定性的には $l=30\text{cm}$ のものとほとんど一致していた。

4. お わ り に

本研究は、枠型透過水制の水理機能に関する基礎資料を得るため、固定床および移動床開水路流れに設置された模型水制を対象とした若干の実験的検討を行なったものであって、本研究により得られた結果をまとめるおつぎのようである。

まず、固定床開水路流れにおける実験より得られたものとしては、

1) 定常等流状態の固定床上的開水路流れに水制が設置されると、流れが常流のとき、水制の抵抗効果により上流側では水位上昇(せき上げ背水)が現われ、下流側では局所的な水位低下がみられるとともに水制より離れるにしたがって水位は回復される。

2) 荒挽きのおが屑をトレーサースとした flow visualization 法による自由表面上の流況観測結果によると、流水が水制を通過するとき、水制ね効果により流水の一部が水制域外(流心側)に押しやられ、一種の縮流状態となるとともに、水制下流側には後流域が形成され、流下に伴う流体混合が進むにしたがい後流域は消滅されることがみられる。このような水制ね効果は水深と水制高とが同程度のときもっとも顕著でありまた、水制後流域の拡がり、水理条件によって異なるが、水制長の数倍程度である。

3) 水路下流端での分流法による水制域内流量の計測結果によると、水制ね効果は一般に水制間隔あるいは水深が大きくなるにしたがって減少するが、一様に減少するのではなく、ある水制間隔あるいはある水深のもとで極大となる。水制ね効果が極大となる時の水制間隔は、水制高の10倍程度、水深は水制高と同程度のものであるが、詳細についてはさらに検討を要する。

4)定温度型ホットフィルム流速計を用いた速度計測結果によると、水制域外（流心部）における平均速度は上流側より水制に近づくにしたがって漸減し、水制よりやや上流側で極小となったのち加速され、水制よりやや下流側で最大となり、それよりさらに下流側では漸減して一定値に近づく傾向がある。また、水制域内での平均速度は水制への接近に伴う漸減が水制よりやや下流側まで継続され、最小値を示したのち漸増し、一定値に近づく傾向がみられる。

5)これに対し乱れ速度の変化はかなり複雑であり、水制域外、水制域内のいずれにおいても水制よりやや上流側と下流側での2断面で極大となり、その中間で極小となる傾向がある。ただし、水制よりやや上流側で極大となる断面は水制域外、水制域内ではほぼ共通しているが、その他は必ずしも一致しない。

一方、移動床開水路流れにおける実験結果によると、

6)移動床流れで砂堆の発生がみられる場合、水制周辺の洗掘・堆積特性は砂堆の伝播との関連より複雑化されるが、水制上流側における若干の堆積ならびに後流域におけるかなりの堆積現象と、水制周辺の洗掘現象とが本実験での共通現象として挙げられる。

7)現段階では水制設置に伴う洗掘・堆積特性を定量化することはほとんど不可能であるが、これらの効果により場合によっては水制の移動ないし転倒の恐れがあり、十分な注意を要する。

以上のように、本研究により杵型透過水制の水理機能の解明に際し必要とされるいくつかの基本事項についての有益な知見が得られたが、本研究の結果は定性的特性の把握に留まるものが多く、定量的特性の解明にはさらに詳細な検討が必要である。なお、模型実験の結果を実際問題に適用するには相似律についての検討が必要であるが、相似律が十分に満足される条件のもとで模型実験を行なうことはきわめて困難と言わざるを得ず、原型実験の併用が不可欠であるとともに、この現象を支配する各要素内に成立する関係を明らかにしなければならない。透過水制の原型実験としては最近になって高梁川で行なわれたものがあり¹⁰⁾、模型および原型実験の積み重ねにより、水制の水理機能が明確になる日もそれほど遠い将来ではあるまい。

最後に、本研究の遂行にさいし実験あるいは資料整理に協力いただいた大学院生浅野富夫氏および久下俊夫氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 秋草 勲, 吉川秀夫, 坂上義次郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 建設省土木研究所報告, 1960, pp. 61~153.
- 2) 秋草 勲, 吉川秀夫: 水制の統計的調査, 土木技術資料, Vol. 1, No. 9, 1959, pp. 11~14.
- 3) 岩佐義朗: 水理学, 朝倉書店, 1969.
- 4) King, L.V.: On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry, Phil. Trans., Roy. Soc., London, A-214, 1914, pp. 373~432.
- 5) Tollmien, W.: Berechnung turbulenter ausbreitungsvorgänge, ZAMM, Vol. 6, 1926.
- 6) 足立昭平: 開水路における棧型人工粗度の実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第3号, 1959, pp. 17~33.
- 7) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究—棧型粗度と溝型粗度—, 京都大学防災研究所年報, 第4号, 1961, pp. 185~193.
- 8) 今本博健, 池野秀嗣: 水制の水理機能に関する研究(1)—不透過水制の抵抗特性について—, 京都大学防災研究所年報, 第17号 B, 1974, pp. 681~699.
- 9) Hinze, J.O.: Turbulence, An Introduction to Its Mechanism and Theory, McGraw-Hill, 1959.
- 10) 川崎製鉄水島製鉄所土木課土木課, 大本組技術研究所水島出張所: 高梁川鋼製水制工試験工事調査報告書, 1974.