

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——

今 本 博 健・池 野 秀 嗣

CHARACTERISTICS OF A FLOW WITH GROYNES (1)

——On the flow resistance with groynes of non-through type——

By *Hirotake* IMAMOTO and *Hidetsugu* IKENO

Synopsis

In this paper, the characteristics of the surface resistance of groynes of non-through type, which are placed in an open channel flow, are investigated experimentally by the relation between the groyne clearance and the flow depth, because the description by usual methods such as a resistance coefficient, an empirical coefficient and an equivalent sand roughness can not always be applied.

The results obtained through experiments are as follows; In the case of the flow depth exceeds the groyne height, the normalized clearance-depth curve is characterized by two kinds of peaks of flow depth, one of which may be resulted from the effect of the vortex shedding and the other the shear stress at the surface of the separation region around groynes. Furthermore, the normalized clearance-depth curve is affected by the groyne length and the height, but the effect of a change in groyne width and phase difference between groynes placed along both sides of levees may be negligible. An increase of a Reynolds number brings an increase of the normalized groyne clearance corresponding with the peak of flow depth resulted from the effect of shear stress, and brings a decrease of the normalized flow depth.

On the other hand, in the case of the groyne height exceeds the flow depth, the meandering effect has a predominant role except for a comparably small groyne length, which is examined using a flow visualization technique. The normalized clearance-depth curve is considerably affected by the phase difference, in contrasted with the case of an exceeding flow depth, and the groyne clearances corresponding with two kinds of peaks of flow depth depend mainly on the channel width.

1. は じ め に

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殿の誘致, あるいは導流などを目的として各種の水制が古くより用いられてきているが, 水制自体の働きは流速減殺機能と流向制御機能とに集約され, これらの機能を効果的に発揮させるため, 従来より数多くの水制工法が考案・実施されてきている¹⁾。

いま, 水制を水理学的見地より分類すると透過水制と不透過水制とに分けられる。透過水制は, 杭工, 杵工, 柵工などのように, 主として流速減殺を目的としたものであって, 水流を一部透過させるため流れより受ける抗力は比較的小さく, 流速を徐々に減少させるとともに流送土砂の沈殿誘致に用いられる。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といった水剎に用いられる。現在, 各地の河川で使用されている水制は, 一般に, 透過性のものが多く, 不透過性のものも水制高を低くすることにより全体として透過性となるようにしている傾向が見られる²⁾。

水制の水理機能を解明するには, 透過水制および不透過水制のそれぞれについて, 流水に及ぼす抵抗特性,

水制周辺に形成される水制域の特性ならびに水制設置に伴う路床の洗掘・堆積特性などについての検討が必要であるが、これらの特性は水制の設置個数、間隔、角度、左右両岸における水制設置の対称性などの水制配列、路床の勾配あるいは移動性、流路の幅あるいは直線性などの流路特性、ならびに流量、水深などと複雑に関係するため、その解明はきわめて困難である。

本研究は、水制の水理機能を解明するための第一段階として、固定床上に多数個設置された不透過水制を対象とし、越流時および非越流時のそれぞれについて、その抵抗特性と水制長、水制高、水制幅および対称性(位相差)との関係を実験的に検討しようとするものであって、水制の設置された流れの抵抗表示として一般に用いられて相当砂粒粗度による方法は必ずしも適当ではないことを明らかにするとともに、水制間隔と水深との関係について系統的検討を加え、水制間隔・水深曲線が2種の極大値によって特性づけられることを明らかにしている。また、これらの極大値の発生機構について流況特性からの検討を試み、越流時においては水制周辺に形成される剝離域からの渦の剝離効果ならびに剝離面におけるせん断力の効果によって説明されるのに対し、非越流時においては流れの蛇行効果によって説明されることが示されている。

2. 水制を有する開水路流れの抵抗表示

流体内に物体がおかれ、物体と流体との間に相対運動があるとき、一般に物体には流体力といわれる抵抗力が作用する。このような抵抗力は物体表面に沿うせん断力にもとづく表面抵抗と表面に垂直に作用する圧力にもとづく形状抵抗とに分けられる。本研究で対象とするような水制を有する開水路流れの取り扱いにおいては、境界層理論などで知られるように、表面抵抗の解明が基本事項として挙げられるが、表面抵抗の大きさは通常つぎのような表示法により評価される。

Darcy および Weisbach は一様な円管路の定常流の損失水頭 H_l に対して摩擦損失係数 f を導入し、次の表示式を提案した。すなわち、

$$H_l = f \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2g} \dots\dots\dots(2.1)$$

ここに、 L は損失水頭 H_l を生ずる間の管長、 D は管径、 U_m は断面平均流速、 g は重力の加速度である。(2.1)式の表示法を開水路流れに適用するには管径を適当な長さの次元をもつ量に置きかえる必要がある。このような量としては、通常、径深 R が用いられるが、 D と R との間には $D=4R$ という関係があるため、(2.1)式は次のように書き直される。

$$H_l = f \frac{L}{4R} \frac{U_m^2}{2g} \dots\dots\dots(2.1')$$

また、損失水頭は運動量保存則より次のように表わすこともできる。すなわち、

$$H_l = \frac{\tau_b}{\rho g R} L \dots\dots\dots(2.2)$$

ここに、 τ_b は壁面におけるせん断力、 ρ は流体の単位体積当りの質量である。

一方、抵抗係数 C_f は壁面におけるせん断力と流体の慣性力との比として定義され、

$$C_f = \tau_b / \left(\frac{\rho}{2} U_m^2 \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

と表わされる。

したがって、いま摩擦速度 U_f 、すなわち、

$$U_f = \sqrt{\tau_b / \rho} = \sqrt{g R I_e} \dots\dots\dots(2.4)$$

ここに I_e はエネルギー勾配 ($I_e = H_l / L$) を表わす、を用いると、 f 、 C_f および U_m / U_f 間の関係式として

$$\frac{U_m}{U_f} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \sqrt{\frac{2}{C_f}} \dots\dots\dots(2.5)$$

が導かれる。(2.5)式より平均・摩擦速度比、摩擦損失係数および抵抗係数はいずれも同義であることが知れ、以下においては、これらによる表面抵抗の表示を総称して抵抗係数による表示ということにする。

表面抵抗は指数式を仮定した断面平均流速式における経験係数によって表示されることもある。この種の代表的なものとして Chézy の係数 C および Manning の粗度係数 n があり、それぞれ次のように定義される。

$$U_m = C\sqrt{RJ_e} \text{ および } U_m = \frac{1}{n} R^{2/3} I_e^{1/2} \dots\dots\dots(2.6)$$

(2.5)および(2.6)式より U_m/U_f , C および n の間の関係式として次式が得られる。

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \text{ および } n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \left(\frac{U_m}{U_f} \right) \right. \dots\dots\dots(2.7)$$

以上の抵抗係数あるいは経験係数による表面抵抗の表示はいずれも断面平均流を対象として導かれたものであるが、断面内の流速分布にもとづくものとして砂粒粗度による表示がある。すなわち、円管の内壁に様な砂粒をはりつけた Nikuradse の実験によると、管壁より r の距離における流速 U は次のように表わされる。

$$\frac{U}{U_f} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{r}{k_s} \dots\dots\dots(2.8)$$

ここに、 A_r および κ は定数であって、 $k_s U_f / \nu \geq 100$ のとき $A_r = 8.5$, κ は Kármán 定数といわれ $\kappa = 0.4$ である。また、 k_s は砂粒径であって、砂粒粗度といわれる。

(2.8)式は様な砂粒より構成される表面の抵抗特性を示すものであるが、同様の表示を様な砂粒以外の粗度要素にまで拡張して適用する場合、相当砂粒粗度 k_s' が(2.8)式における k_s を k_s' に置きかえることにより定義される。

開水路流れにおける流速分布に(2.8)式で示された対数則を適用する場合、定数項は Froude 数によって若干変化するが³⁾、一応 $A_r = 8.5$ とし、さらに水路幅の有限性などの断面形状の効果を考慮して水深を径深 R におきかえると、つぎの抵抗表示式が得られる。

$$\frac{U_m}{U_f} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s'} \dots\dots\dots(2.9)$$

以上のように、表面抵抗の表示法には、抵抗係数、経験係数、相当砂粒粗度といった各種のものがあるが、これらのうち無次元量は抵抗係数のみである。しかしながら、一般に、抵抗係数は水理条件によって変化するため表面抵抗の表示としてつねに適當であるとは限らない。これに対し経験係数、とくに Manning の粗度係数は、[長さ]^{-1/3}・[時間] という次元をもつが、(2.7)および(2.9)式より知れるように、

$$\frac{n}{k_s'^{1/6}} = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(\frac{R}{k_s'} \right)^{1/6} \left\{ 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s'} \right\}^{-1} \dots\dots\dots(2.10)$$

となり、 R/k_s' の値がきわめて小さくないかぎり(2.10)式の右辺は R によってあまり変化せず、Manning の粗度係数は表面の粗さのみによって定まる定数として取り扱われることが多い。一方、相当砂粒粗度は表面の粗さを直接的に表現するものであって、表面抵抗の表示としてはもっとも妥当のように考えられるが、相当砂粒粗度の定義は流速分布への対数則の適用性を基本としているため、対数則が適用されない場合の相当砂粒粗度の物理的意義は不明瞭となる。なお、水制を有する流れの抵抗を(2.9)式に基づいた k_s' で表示しようとする場合、路床基準面の選定が問題となるが、現段階においては選定法が確立されていないため、 k_s' でもって表面抵抗を評価できないこともある。

3. 水制の抵抗特性に関する実験

本研究に用いた実験水路は、Fig. 3-1 に示されるように、幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 13 m の長方形断面滑面直線水路であって、路床勾配は水路の上下流側に設けられたジャッキにより $\pm 1/20$ 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、不透水水制のモデルとして $1.6 \text{ cm} \times 1.6 \text{ cm} \times 4.0 \text{ cm}$ の真鍮ブロックを組み合わせ、水制長、水制高および水制幅の異なる種々の大きさのものが用いられている。

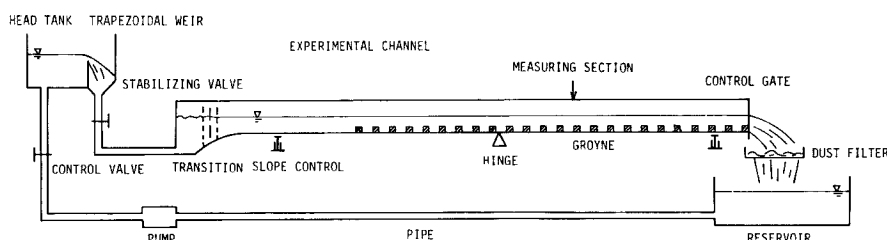


Fig. 3-1 Experimental channel.

本研究においては、多数個の水制が設置された場合における水制間隔と抵抗特性との関係の解明に重点をおいたため、水路下流端より 4.5 m 上流側の断面を基準断面とし、この断面より上流側に 30 組、下流側に 60 組の合計 90 組の水制モデルを一定間隔ごとに配置し、水制配置部の上下流側にアクリル樹脂板による遷移部を設けることにより計測断面近傍の流れをできるだけ等流状態に近づけるよう努力されている。水深の計測は、基準断面近傍において、1 水制間隔以上の距離にわたり流れ方向に等間隔に選ばれた 7 点で行なわれ、計測された最大値および最小値を除く 5 個の平均値をもって水深の計測値とされている。

水制を有する流れの抵抗特性は越流時と非越流時とで異なり、前者は路床底面粗度の増加として、また後者は側壁面粗度の増加として取り扱われるが、砂粒粗度のような一様粗度の場合と異なり水制周辺に形成されるはくり域の影響がきわめて顕著であるため、抵抗特性の解明には水制周辺の局所流の特性についての検討が必要となる。このため本研究においても水制周辺の流況特性の把握に努め、とくに非越流時の流れについては荒挽きのおが屑をトレーサーとして用いた flow visualization 法を併用し、抵抗特性と流況特性との関係についての検討が行なわれている。

4. 越流時の抵抗特性

4.1 抵抗表示に関する検討

2.において述べたように、流れの抵抗特性は、通常、抵抗係数、経験係数あるいは相当砂粒粗度などによる表示によって検討されるが、抵抗係数による表示には Darcy-Weisbach の摩擦損失係数、抵抗係数あるいは平均速度と摩擦速度との比によるものなどがあり、また代表的な経験係数として Chézy の係数あるいは Manning の粗度係数がよく用いられる。以下においては、抵抗係数および経験係数による表示例としてそれぞれ平均・摩擦速度比および Manning の粗度係数を選び、相当砂粒粗度による表示をも加えて、不透水水制が設置された開水路流れの抵抗表示へのこれらの適用性について検討する。

いま、不透水水制が設置された流れの一例として、水路幅 $2B=40 \text{ cm}$ 、路床勾配 $I=1/500$ の水路に長さ $l=12 \text{ cm}$ 、高さ $h=1.6 \text{ cm}$ 幅 $b=1.6 \text{ cm}$ の水制が一定間隔（水制純間隔 $c=14.4 \text{ cm}$ ）ごとに左右両岸での配列を対称（位相差 $\phi=0$ ）に設置された場合を取り上げ、流量と水深との関係を実験的にもとめ、すでに述べた 3 種の抵抗表示法を用いて流量変化に伴う抵抗の変化特性について検討するとつぎのようである。

平均・摩擦速度比：水制の設置された流れの取扱いにおいては水深計測の基準となる路床面の有効高の選定が不明確であって、一般に、水制間隔が十分小さな場合の有効高は水制頂面の高さに一致するが、水制間隔が大きくなるにしたがって低下し、水制底面と同じ高さに近づく^{4),5)}。したがって本研究においては有効流水断面として、Fig. 4-1 に示されるような3種のもの、すなわち、水制域における有効路床高を、(a) 水制頂面の高さ、(b) 水制高の1/2の高さ、(c) 水制底面の高さ、にとったものを用い、それぞれの場合における流量と水深の関係を平均・摩擦速度比と径深・水制高比との関係として示すと Fig. 4-1 のようになる。

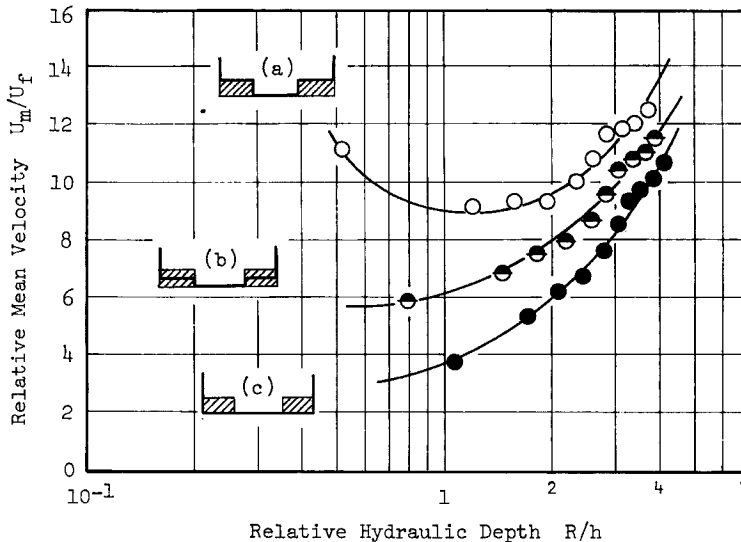


Fig. 4-1 Representation of flow resistance by the ratio of mean to shear velocity.

Fig. 4-1 より明らかなように、有効流水断面として (a) の型を用いるときの U_m/U_f は R/h の増加にしたがって一旦減少したのち増加するという傾向が見られるのに対し、(b) および (c) の型についてのものは R/h の増加にしたがってほぼ一様に増加している。このような U_m/U_f と R/h との関係を砂粒粗度 k のような一様粗面上の2次元流れの場合と比較すると、後者における U_m/U_f は $\log(R/k)$ の増加に伴い直線的に増加するが、水制の設置された流れについての径深増加に伴う U_m/U_f の増加特性は直線関係によって説明されず、水制高と相当砂粒粗度との関係は径深すなわち流量によって変化することが知れる。なお、(a) についての U_m/U_f は、 R/h の小さいとき、 R/h が減少するにしたがって増加しているが、これは流水断面形状がいわゆる複断面形状であることの効果によるものと考えられる。

Manning の粗度係数：Fig. 4-1 で用いられた流量と水深との関係を Manning の粗度係数 n と摩擦速度および径深にもとづく Reynolds 数 $U_f R/\nu$ との関係として表わすと Fig. 4-2 のようになり、有効流水断面として用いられた (a), (b) および (c) のいずれについても n は $U_f R/\nu$ によって顕著に変化することが知れる。すなわち、(a) についての n は、 $U_f R/\nu$ の小さな領域では $U_f R/\nu$ の増加にしたがって増加するが、ある程度以上 $U_f R/\nu$ が大きくなると逆に減少するのに対し、(b) および (c) についてはいずれも $U_f R/\nu$ の増加に伴い n はつねに減少する傾向が認められる。したがって、 $U_f R/\nu$ が小さな領域のみを対象とすると、路床面の有効高として水制高の頂向と半高の間をとることにより、 $U_f R/\nu$ によって n が変化しないような有効流水断面の選定が可能であるが、 $U_f R/\nu$ の広範囲の領域にわたって n が一定となるような有効流水断面の選定は不可能であって、結局、Manning の粗度係数による表示はあまり適当でないといえよう。

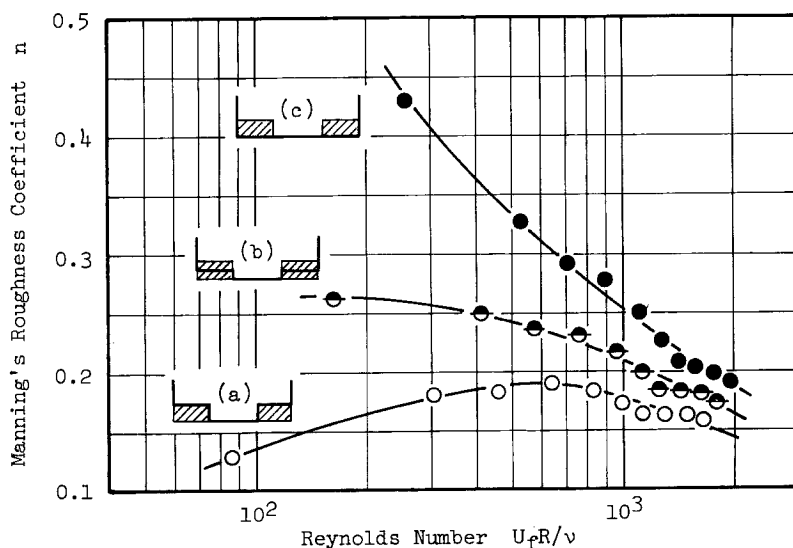


Fig. 4-2 Representation of flow resistance by Manning's coefficient.

相当砂粒粗度：すでに平均・摩擦速度比と径深・水制高比との関係において指摘されたように、水制の設置された流れに関する相当砂粒粗度は流量によって変化することが知られているが、このような特性は Fig. 4-1 で用いたと同じデータを用い、相当砂粒粗度・水制高比 k_s'/h と $U_f R/\nu$ との関係を示した Fig. 4-3 によっても確かめることができる。すなわち、(a) および (b) についての k_s'/h は $U_f R/\nu$ の小さな領域では $U_f R/\nu$ の増加にしたがって増加し、 $U_f R/\nu$ の大きな領域では逆に減少し、(c) についての k_s'/h は $U_f R/\nu$ の増加にしたがってつねに減少している。したがって、 $U_f R/\nu$ の小さな領域のみを対象とする場合には、 $U_f R/\nu$ の変

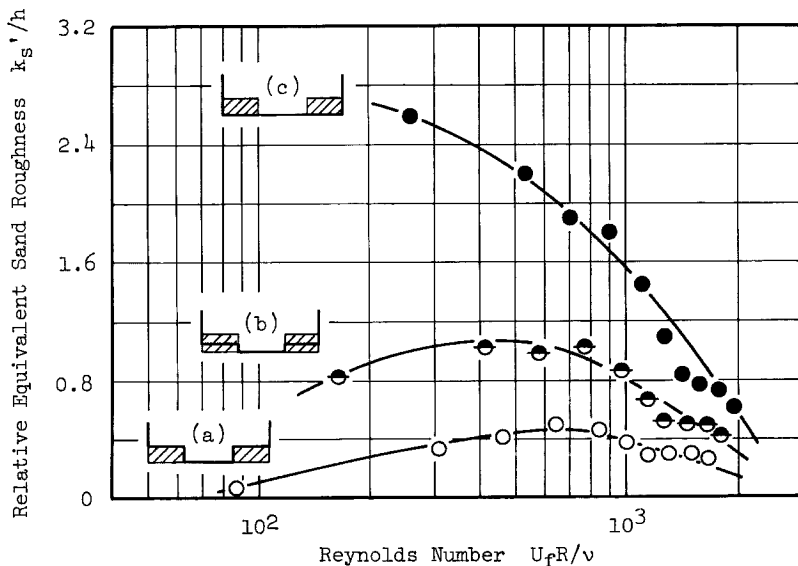


Fig. 4-3 Representation of flow resistance by equivalent sand roughness.

化に伴う k_s'/h の変化が小さな (b) の有効流水断面の選定がもっとも妥当のようであり、秋草ら⁷⁾の結果と一致するが、 $U_f R/\nu$ の大きな領域にまで適用することは許されず、水制の設置された流れの抵抗表示における相当砂粒粗度による方法についてもつねに適当であるとは断定されない。

4.2 水制間隔・水深曲線

前節で述べたように、水制の設置された流れの抵抗を Manning の粗度係数あるいは相当砂粒粗度によって表示する方法はつねに適当であるとはいえず、また平均・摩擦速度比は一般に Reynolds 数によって変化するため、以下においては、抵抗を表わすもっとも単純な量として水制底面を基準とした水深を採用し、水制間隔と水深との関係より抵抗特性を検討することにする。

水制の設置された流れの抵抗が水制間隔によって変化するということはすでに多くの研究者によって確かめられているが⁸⁾、その多くは水制が水路幅全体にわたる全幅水制あるいは機型粗度を対象としたものであって、一般的な水制形状との関連についてはほとんど検討されていない。このため、水制長、水制高および水制幅という水制要素の形状、ならびに左右両岸での水制配列の位相差の水制間隔・水深曲線に及ぼす効果について検討するとともに、流量変化による影響についての検討を行ない、水制間隔・水深曲線の特性を水制周辺の流況モデルによる説明を試みる。

Fig. 4-4a~b は水制間隔・水深曲線に及ぼす水制長 l 、水制高 h 、水制幅 b および位相差 ϕ の効果を代表例によって示したものである。まず、流量 $Q=10.2$ l/sec、断面平均流速および水制底面を基準とした水深にもとづく $Re=19,900$ のもとで、 $h=b=1.6$ cm の水制を $\phi=0$ として設置した場合の水制純間隔・水制高比 c/h と水制が設置されたときと設置されないときの水深比 H/H_0 との関係に及ぼす水制長の効果を示した Fig. 4-4a によると、 $l=20$ cm すなわち水制長・水路半幅比 $l/B=1$ の全幅水制の場合、 c/h がある値以下の領域では c/h が増加するにしたがって H/H_0 も増加するが、 c/h がこの値を超える領域では逆に c/h の増加にともない H/H_0 は減少する傾向が見受けられ、全幅水制に関する水制間隔・水深曲線は $c/h=6\sim 8$ 近傍におけるただ1種の極大値によって特性づけられることが知れる。一方、 l/B が1より小さい一般の水制の場合、水制間隔・水深曲線には $c/h\approx 2.5$ および $c/h=6\sim 8$ 近傍での2種の極大値の存在が認められ、全幅水制の場合とはかなり異なった特性を示している。

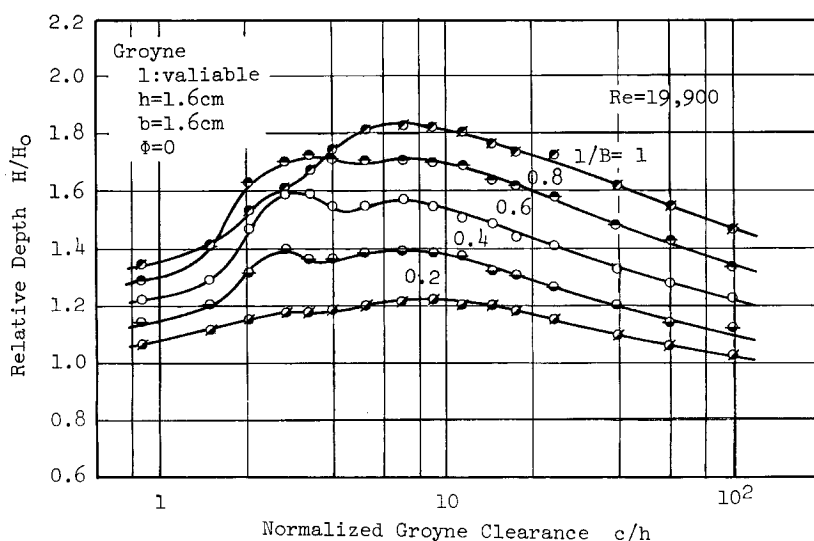


Fig. 4-4a Effect of groyne length on the relation between groyne clearance and flow depth.

また、水制間隔・水深曲線に及ぼす水制高の効果についてみるために、同一流量のもとで水制長および水制幅が等しく水制高のみが異なる場合についての水制間隔・水深曲線を示すと **Fig. 4-4b** のようになり、水制高の大きいものほど同一の c/h における H/H_0 は大きくなるとともに、極大値発生時の c/h もまた大きくなることが知れる。さらに、水制幅および位相差の効果を示した **Fig. 4-4c** および **Fig. 4-4d** によると、いずれの効果もそれほど顕著には認められず、水制幅変化による水制要素周辺に形成される剝離域の変化に伴う影響は無視される程度であることが知れるとともに、越流時の流れに及ぼす左右両岸の水制効果は互いに独立であると考えられる。

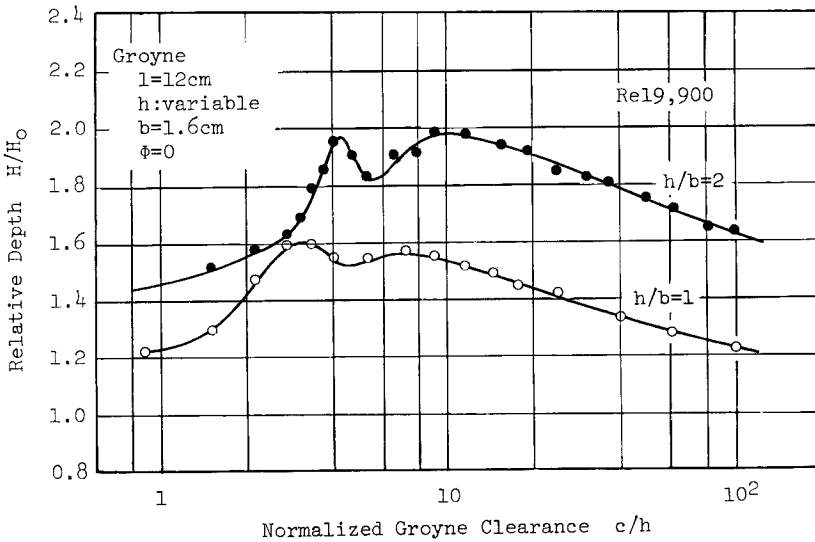


Fig. 4-4b Effect of groyne height on the relation between groyne clearance and flow depth.

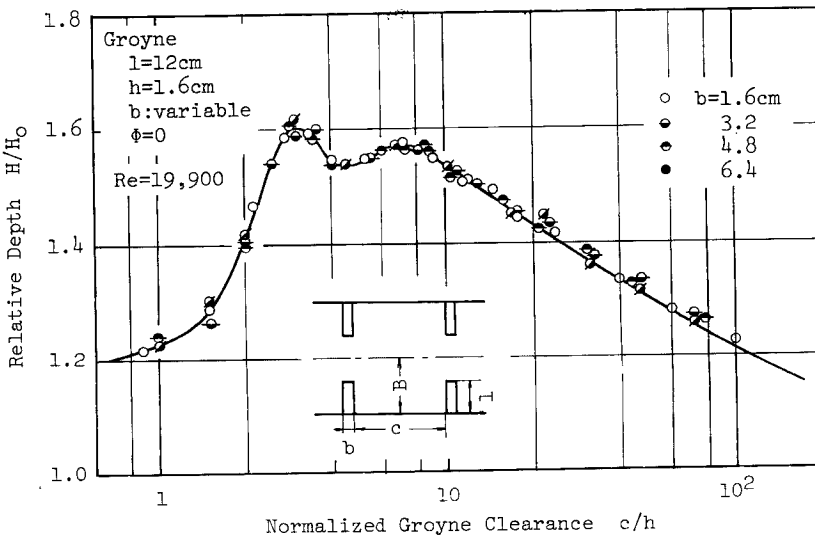


Fig. 4-4c Effect of groyne width on the relation between groyne clearance and flow depth.

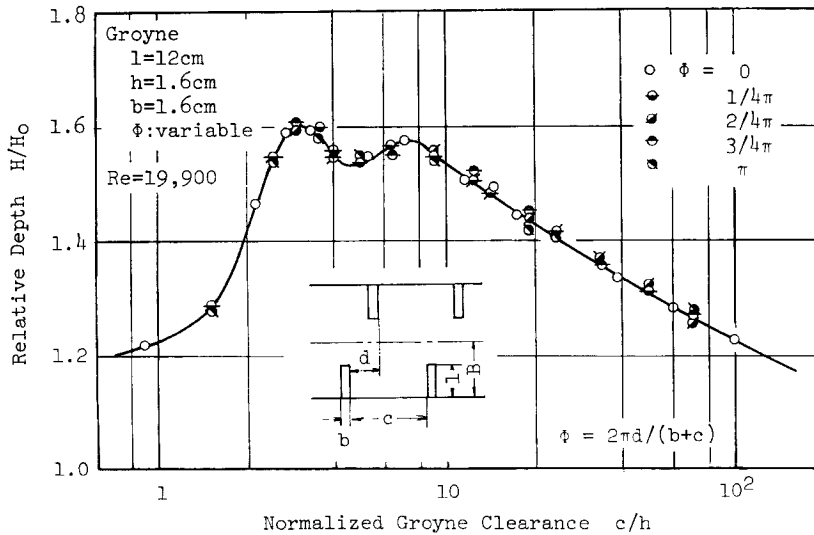


Fig. 4-4d Effect of phase difference of groynes on the relation between groyne clearance and flow depth.

一方、水制長、水制高、水制幅および位相差を一定に保ち、流量を変化させた場合の水制間隔・水深曲線を示すと Fig. 4-5a および b のようになり、 $l/B=1$ および 0.6 のいずれについても Reynolds 数が大きくなるにしたがって H/H_0 は一部の領域を除いて減少する傾向を示すが、減少の度合いは Reynolds 数が大きくなると小さくなることが知れる。また、 $l/B=1$ および 0.6 の場合を比較すると、とくに $l/B=0.6$ の場合におい

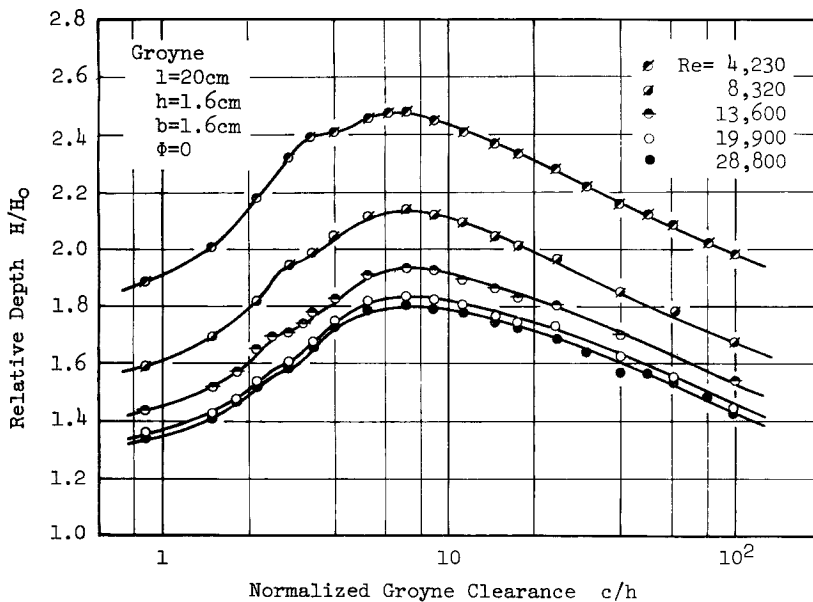


Fig. 4-5a Effect of Reynolds number on the relation between groyne clearance and flow depth in the case of unit ratio of groyne length to channel half-width.

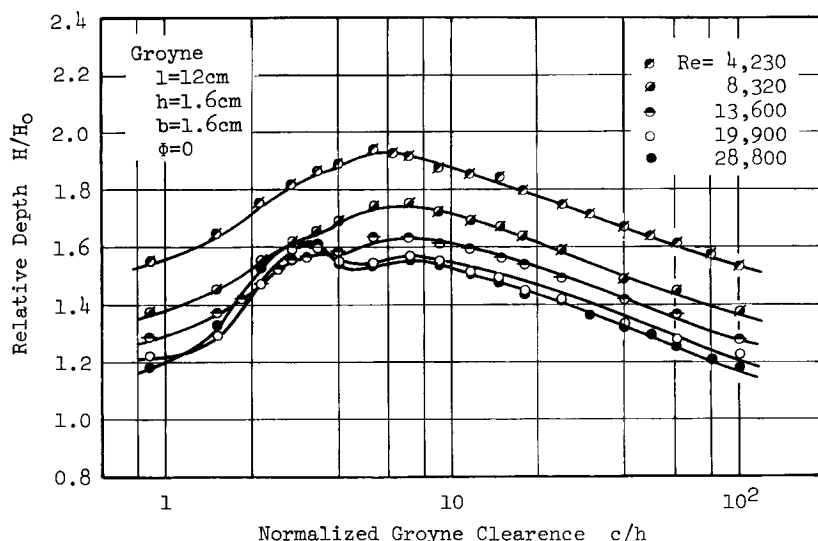


Fig. 4-5b Effect of Reynolds number on the relation between groyne clearance and flow depth in the case of the ratio of groyne length to channel half-width is 0.6.

て Reynolds 数の大きくなるときに顕著に認められる $c/h \approx 2.5$ 近傍の極大値が $l/B=1$ の場合については不明瞭となり、水制間隔・水深曲線におけるわずかな盛り上がりとして認められるのみである。さらに、極大値発生時の水制間隔についてみると、 $c/h=6 \sim 8$ 近傍の極大値については Reynolds 数が大きくなるにしたがって極大値発生時の c/h は大きくなり 8 に近づくのに対し、 $c/h \approx 2.5$ 近傍のものについては Reynolds 数が大きくなると逆に減少し 2.5 に近づいている。

以上より明らかなように、水制の設置された流れにおける抵抗は水制間隔・水深曲線における 2 種の極大値によって特性づけられるが、このような抵抗特性を水制要素周辺における流況特性より説明づけるとつぎのようである。すなわち、水制間隔の変化に伴う水制要素周辺における流況観察によると、流況は水制間隔に応じ Fig. 4-6 に示されるような 4 種に分類され、それぞれの特性はつぎのように記述される。

(a) 流れのなかに水制が設置されると、一般に、水制要素の上下流側周辺に剝離域が形成されるが、水制間隔がきわめて小さい場合、剝離域の広がりには水制頂面の高さに押えられ、剝離域外の流れは水制頂面を結ぶ面にはほぼ平行となるのに対し、剝離域内の流体はほとんど静止状態にあり、剝離域外の流体との混合交換はほとんど見られない。この状態の流れについては一様粗度上の流れとほぼ同

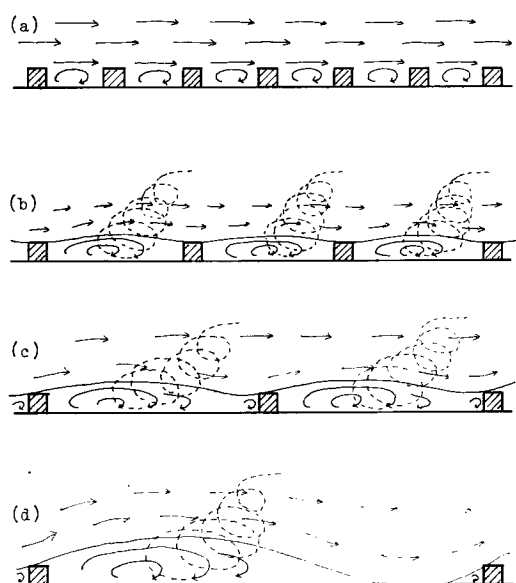


Fig. 4-6 Schematic illustration of flow pattern model around groynes of non-through type.

に取扱いが許される。

(b) 水制間隔が大きくなるにしたがって剝離域も次第に発達し、水制間での剝離域の高さは水制高より若干高くなるが、剝離域の形成はかなり不安定であって鉛直および横方向に振動するようである。また、剝離域内の流体は間欠的に剝離域外の流体と入れ変り、いわゆる渦の離脱が見られるようになる。水制間隔が小さいとき渦の離脱周期は水制間隔の増加に伴い急激に減少するが、水制間隔が大きくなるにしたがって離脱周期の減少率は小さくなる。したがって、単位流下距離あたりの渦の離脱に伴うエネルギー損失量はある水制間隔で極大となり、それ以上あるいはそれ以下の水制間隔のもとでは水制間隔の増加あるいは減少に伴いエネルギー損失量は小さくなるものと考えられる。

(c) さらに水制間隔が大きくなると、水制要素周辺の剝離域もまた発達し、剝離域境界面におけるせん断力の効果によるエネルギー損失は大きくなる。ただし、水制間隔増加に伴う剝離域の発達には限界があるため、単位流下距離あたりのせん断力の効果によるエネルギー損失量は (b) の場合とは別の水制間隔のもとで極大を示すことになる。

(d) 水制間隔が十分大きくなると水制要素周辺の剝離域の広がりは一の水制要素が設置された場合に近づき、水制間隔によって剝離域の広がりほとんど変化しなくなるため、単位流下距離あたりの剝離域境界面におけるせん断力の効果によるエネルギー損失量は水制間隔の増加に伴い減少するようになる。

以上の流況モデルにより、越流時の水制間隔・水深曲線における 2 種の極大値の発生機構について検討すると、 $cl/h \approx 2.5$ 近傍における極大値は (b) の渦の離脱効果によるものであり、 $cl/h = 6 \sim 8$ 近傍における極大値は (c) の剝離域境界面におけるせん断効果によるものと考えられる。なお、渦の離脱効果が $l/B = 1$ のときには顕著でなく $l/B < 1$ のとき顕著となる理由としては、 $l/B = 1$ の場合には渦の離脱が水路幅全体にわたって発生するのに対し、 $l/B < 1$ の場合には水制域内に限定されるためいわゆる複断面効果が加わり、水制域と水路中央部の主流域との境界面での渦の発達を助長することになるという理由が挙げられるが、詳細については不明であり、今後の研究に待たねばならない。

なお、Fig. 4-6 に示した流況モデルと足立⁴⁾による棧型粗度上の流れの分類とを比較すると、(a) は完全干渉流に、(b) および (c) は不完全干渉流に、(d) は孤立粗度流に対応するものと考えられる。

5. 非越流時の抵抗特性

5.1 水制間隔・水深曲線

非越流時の水制の流れに及ぼす効果は単断面流れの側壁粗度を大きくしたものとも理解されるが、水制間に形成される鉛直渦の効果により主流部に水路幅方向の力が作用するため単なる側壁面における一様粗度の増加としては把握されず、越流時とはかなり異なった抵抗特性を示すものと考えられる。以下においては、抵抗特性を越流時の場合と同様、水制間隔・水深曲線の特性によって検討するが、水制間隔（純間隔： c ）については水路幅（水路半幅： B ）で無次元化するとともに、水制底面を基準とした水深 H については水制を設置しない場合の水深 H_0 で無次元化することにする。

まず水制間隔と水深との関係に及ぼす水制長 l および左右両岸での水制配列における位相差 ϕ の効果に関する実験結果の一例を示すと Fig. 5-1 のようになる。Fig. 5-1a は流量 $Q = 2.07 l/sec$, $Re = U_m H / \nu = 4100$ のもとで、種々の長さの水制が左右両岸で対称に配置された場合の水制間隔と水深との関係を水制純間隔・水路半幅比 c/B と水制の設置された場合および設置されない場合の水深比 H/H_0 との関係として示したものであるが、その特性は l/B によって顕著に異なり、 $l = 12$ および 8 cm すなわち $l/B = 0.6$ および 0.4 については $c/B = 0.8$ および 2.4 近傍で明瞭な 2 種の極大値の発生が認められるのに対し、 $l = 4 \text{ cm}$ すなわち $l/B = 0.2$ についての明瞭な極大値の発生は $c/B = 1.6$ 近傍での 1 種しか認められず、流れの状況は両者の間で異なるものと考えられる。このような極大値の発生原因ならびに水制長による水制間隔・水深曲線特性の差異についてはのちに流況パターンより検討することにする。また同じ Reynolds 数のもとで $l/B = 0.6$ の水制に関する水制

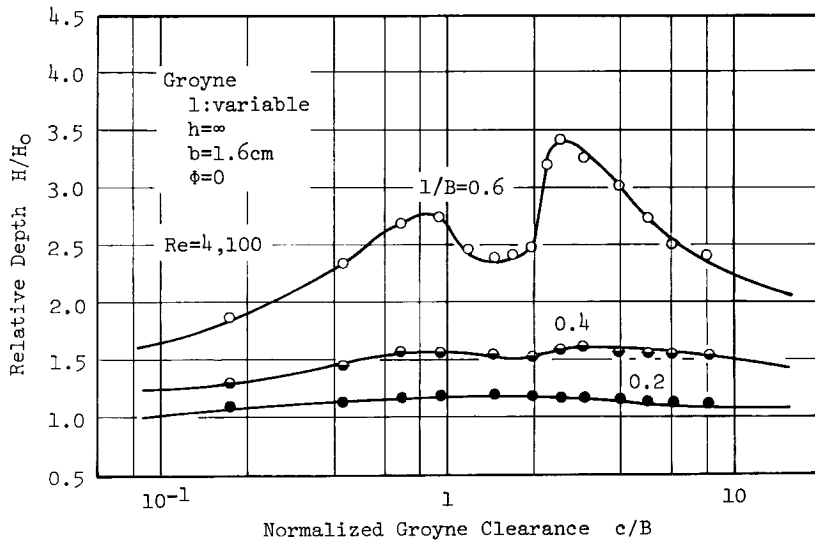


Fig. 5-1a Effect of groyne length on the relation between groyne clearance and flow depth (non-over flow groyne).

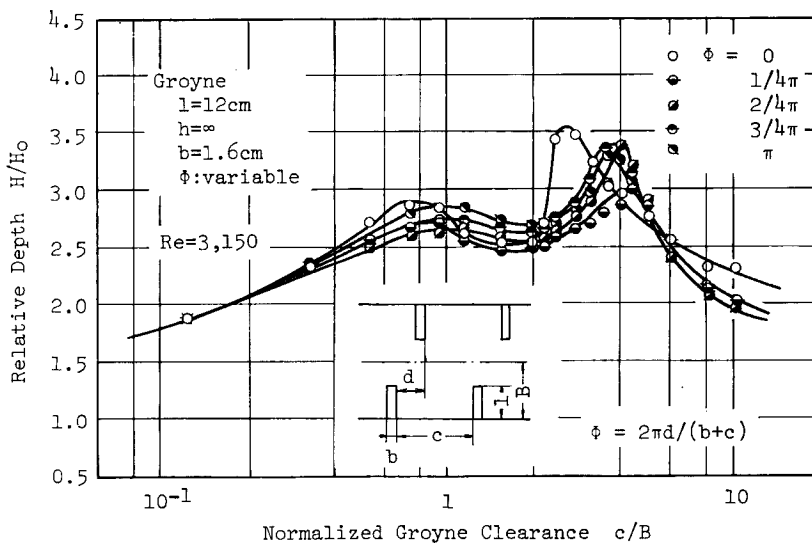


Fig. 5-1b Effect of phase difference of groynes on the relation between groyne clearance and flow depth (non-over flow groyne).

間隔・水深曲線における左右両岸での位相差の効果を表わした **Fig. 5-1b** によると、越流時における水制間隔・水深曲線が ϕ によってほとんど変化しなかったのとは対照的に、非越流時のものは ϕ によって異なり、極大値発生時の水制間隔ならびに極大値の大きさは ϕ によってかなり異なることが知れる。このような ϕ の変化に伴う水制間隔・水深曲線の差異は水制近傍の流れが左右両岸間で互いに干渉しあっていることを意味しており、のちに検討する蛇行効果によって説明される。

つぎに、流量すなわち Reynolds 数変化に伴う水制間隔・水深曲線の変化特性を左右両岸で対称に配列された $l/B=0.6$ および 0.2 の場合について示した Fig. 5-2 によるとつぎのことが知れる。すなわち、Fig. 5-2a より、 $l/B=0.6$ についてのものは Reynolds 数に関係なく 2 種の極大値が認められ、極大値発生時の水制間隔はいずれの極大値についても Reynolds 数によってほとんど変化せず、また、 c/B のきわめて小さな領域を

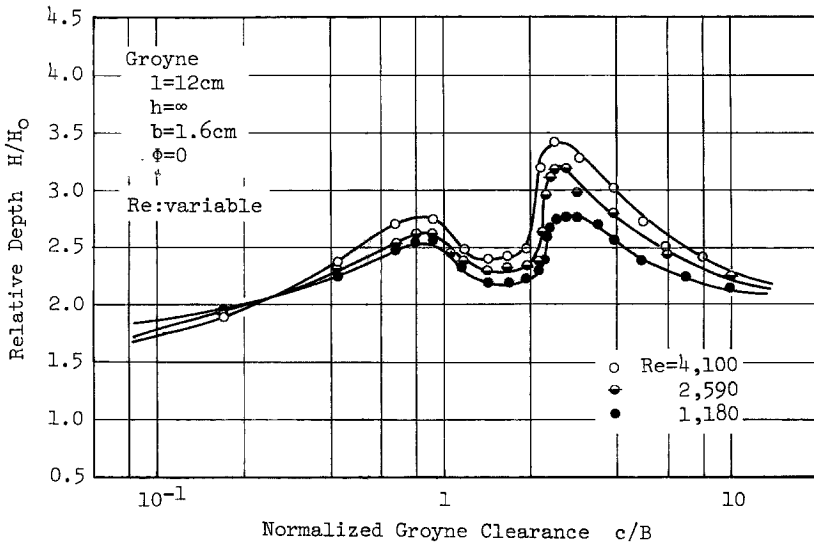


Fig. 5-2a Effect of Reynolds number on the relation between groyne clearance and flow depth in the case of the ratio of groyne length to channel half-width is 0.6 (non-over flow groyne).

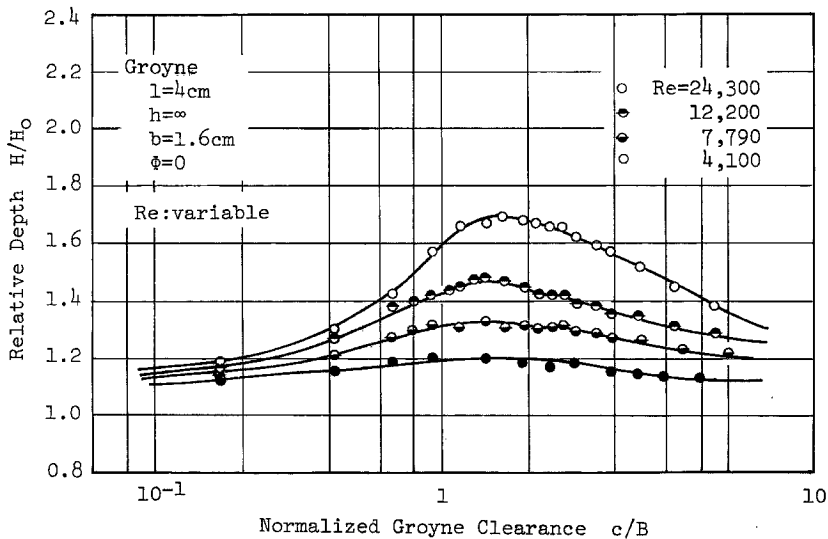


Fig. 5-2b Effect of Reynolds number on the relation between groyne clearance and flow depth in the case of the ratio of groyne length to channel half-width is 0.2 (non-over flow groyne).

除いて Reynolds 数が増加するにしたがって H/H_0 は減少することが知れる。一方、 $l/B=0.2$ については、**Fig. 5-2b** にみられるように、Reynolds 数がかかなり大きなものについても1種の極大値の発生しか認められず、その発生時の水制間隔も $l/B=0.6$ のものとは異なり $c/B=1.6$ 程度となっている。この場合の極大値発生水制間隔を水制長との比として表わすと $c/l \approx 8$ となるが、越流時の全幅水制に関する極大値発生水制間隔 $c/h \approx 8$ とよく一致しており、非越流時の水制間に形成される水平面上の渦の機構と越流時の水制周辺に形成される鉛直面上の渦の機構間の相似性を示すものとして注目される。

5.2 水制周辺の流況特性

5.2.1 Flow Visualization による検討

非越流時の水制間隔・水深曲線における2種の極大値の発生機構について水制要素周辺の流況特性より検討するため、自由表面上における流況を荒挽きおが屑トレーサーを用いた flow visualization 法により観測することにする。なお、水制長として $l=12$ および 4 cm すなわち $l/B=0.6$ および 0.2 の2種を選び、**Fig. 5-1** に示したと同じ Reynolds 数のもとにおいて水制純間隔 c を $7.4, 16.4, 34.4, 52.4$ および 88.4 cm の5通りに変化させ、それぞれの流況を露光時間 $1/4\text{ sec}$ として写真撮影したが、 $l/B=0.6$ の場合を **Photo 5-1a** に、 $l/B=0.2$ の場合を **Photo 5-1b** に示す。これらの写真より非越流時の水制要素周辺の流況特性としてつぎの事項が知れる。

a. $l/B=0.6$ の場合

i) $c/B=0.37$: 流れは水制域内と主流部とに明瞭にわかれ、水制域内の流体はほとんど静止しておりきわめて弱い渦運動が見られるのみである。水制域外の主流部の流れは水制の影響により水制との境界面近傍で若干流向を曲げられるが、水制先端を結ぶ方向とほぼ平行に流下するとみなしうる。また、水制域内の渦運動の向きは左岸側では反時計回りに、右岸側では時計回りである。なお、主流部で斜めに白く写っているのは水制域より発生する衝撃波によるもので、主流の流向にはほとんど関係しない。

ii) $c/B=0.82$: この間隔は水深・水制間隔曲線における最初の極大値の発生間隔にほぼ一致するものであるが、水制域内の水は間欠的に主流部と入れかわるようになり、流れはにわかに蛇行を始める。このため水制域内の渦運動の向きは、 $c/B=0.37$ の場合と同様に、左岸側では反時計回り、右岸側では時計回りとなっているが、ときどき主流部にまで広がり主流部における流れの蛇行を助長している。蛇行の波長はほぼ水制間隔の2倍となっているが、蛇行の位置は安定したものではなく、数秒ないし数10秒ごとに水衝部は変化し、蛇行の向きも変化する。なお、水面は左右両岸で逆位相の状態で顕著な振動を繰り返している。

iii) $c/B=1.72$: 水制域内の渦は流れ方向に大きく引き延ばされて扁平となるが、かなり安定したものとなって主流部の流れとの入れかわりは少なくなる。水制域内には隅角部で副次的な渦の発生がいくつかみられることもあるが、これらの渦は発生・消滅しつついずれも水制域内に留まったままの状態がかなりの時期にわたって持続する。このため主流部の流れはほぼ直線的に流れ、蛇行はほとんどみられなくなる。この間隔での水面の振動は、i) および ii) の場合に比し、かなり小さくなり、左右両岸間の水位差もみられなくなる。

iv) $c/B=2.62$: この間隔は水制間隔・水深曲線において2番目の極大値の発生間隔にほぼ一致するものであるが、流れは水制域を押しつけて左側壁面から右側壁面にまで及び水路幅全体にわたる顕著な蛇行の発生が認められる。このため水制域内の渦は隅角部へ追いやられたり、水路中央を越えて大きな円運動をしたりする。写真でみられる蛇行の波長は水制間隔のほぼ2倍であるが、数10秒程度の周期でもって時間的にかなり大きく変動し、極端な場合は1水制間隔にまで小さくなることもある。

v) $c/B=4.42$: 水制間隔ごとに横方向に水路幅の2/3程度の広がりをもつ渦運動が水制間隔ごとにみられ、iv) の場合に比し、蛇行の曲率は小さくなり、蛇行位置の変動周期はこれまでのものに比しかなり大きくなる。

以上の流況観察結果より非越流型不透過水制の水制間隔・水深曲線の特性について検討すると、水制間隔が極大値発生時のものにほぼ一致するとみられる ii) および iv) においては、いずれについても主流部の流れに蛇行の発生が顕著に認められ、両者の中間の $c/B=1.72$ では、蛇行の発生が認められず、水深が低下するこ

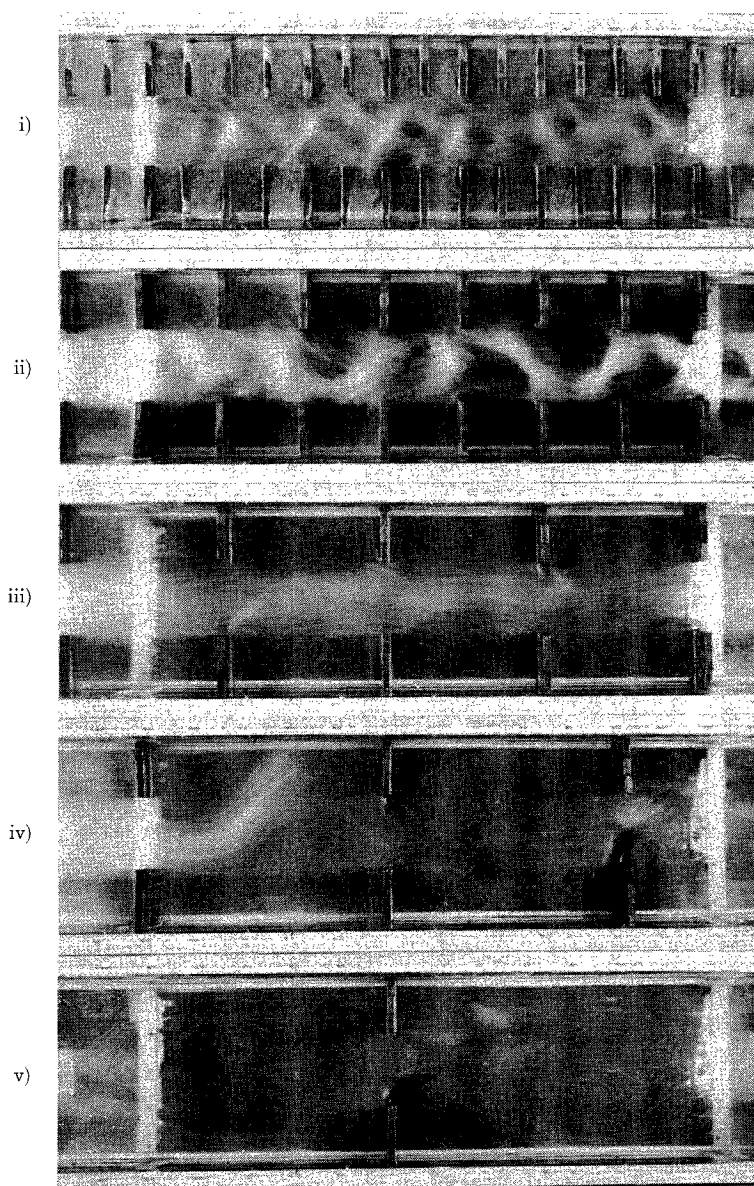


Photo 5-1a Flow visualization on the free surface with relative groyne length of 0.6 ($R_e=4100$).

i) $c/B=0.37$, ii) $c/B=0.82$, iii) $c/B=1.72$, iv) $c/B=2.62$, v) $c/B=4.42$

と併せて、非越流時における不透水制の極大水深の発生は蛇行に関係することが確かめられる。なお、v) については蛇行の発生は顕著であるが、蛇行の振幅・波長比は iv) の場合より小さくなり、単位流下距離あたりの蛇行によるエネルギー損失量は iv) の場合より小さくなっている。

b. $l/B=0.2$ の場合

Photo 5-1b にみられるように、水制域内に形成される渦は水制間隔によって若干変形するが、主流部における流れは水制間隔に関係なく直線的に流下している。水制域に形成される渦はかなり小さく、頻繁に主流

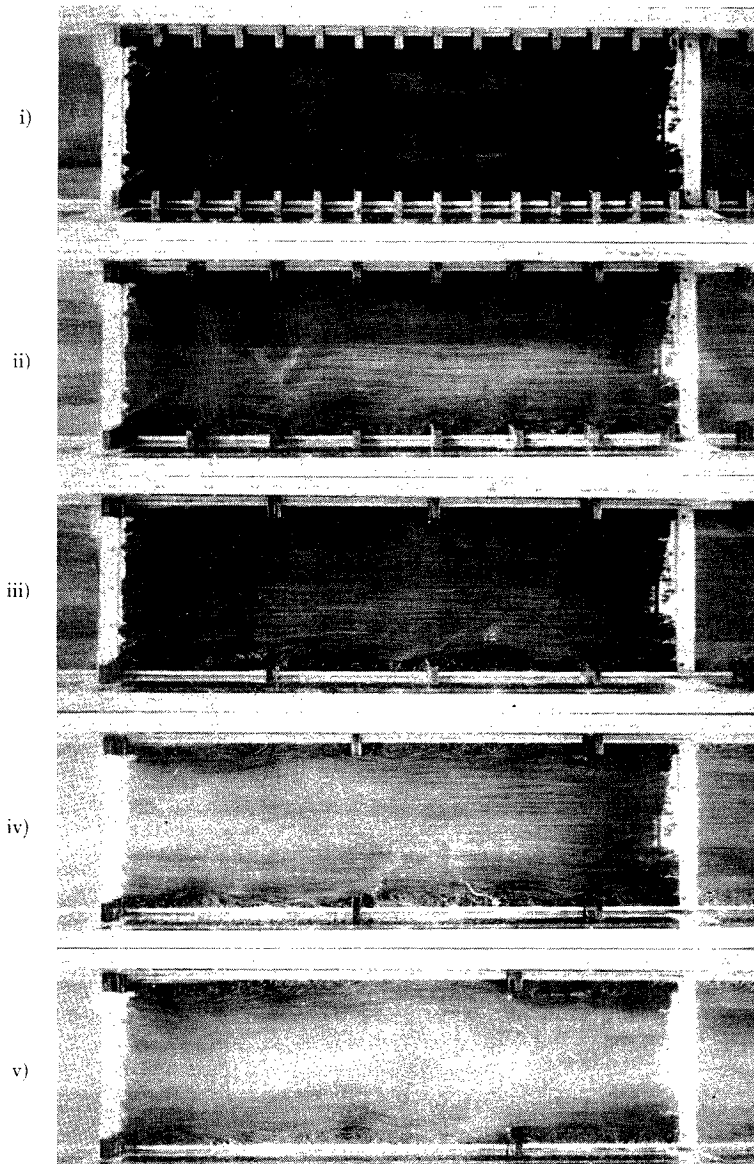


Photo 5-1b Flow visualization on the free surface with relative groyne length of 0.2 ($R_g=4100$).

i) $c/B=0.37$, ii) $c/B=0.82$, iii) $c/B=1.72$, iv) $c/B=2.62$, v) $c/B=4.42$

と交換される。

なお、i)～iv) についての水制間は後流渦でつながっているが、v) の場合には水制より離れるにしたがって側壁面にまで主流が広がり、後流域は水制近傍に閉じ込められたようになっている。また、iii)～iv) のものについては、後流渦が主流方向に広がり、主流の領域は狭められている。

以上の流況観察結果を用いて水深・水制間隔曲線の特性について検討すると、 $l/B=0.2$ の場合、いずれの水制間隔においても顕著なピーク水深の発生が認められないことに一致し、また、不明瞭ではあるが iii)～iv)

の間で若干水深が大きくなっていることは後流域の発達により主流領域が狭められ水深の増加を招いたためと考えられる。

5.2.2 多点速度計測による検討

flow visualization による流況観察で確かめられた蛇行現象について、流速の変動特性より検討するとつぎのようである。すなわち、3 台の円錐型プローブを用いたホットフィルム流速計を用い、計測点の位置として鉛直方向には路床面よりの高さを水深の1/2、横方向には1 台を水路中央部 (A 点)、他の 2 台は水路中央部に關し対称に非越流水制の先端より 2 cm 中央側に寄ったところ (B および C 点) とし、流れ方向には相隣の水制間の中点を選び、それぞれの点における速度の同時計測を行なった。なお、水制間隔としては、先の流況観察

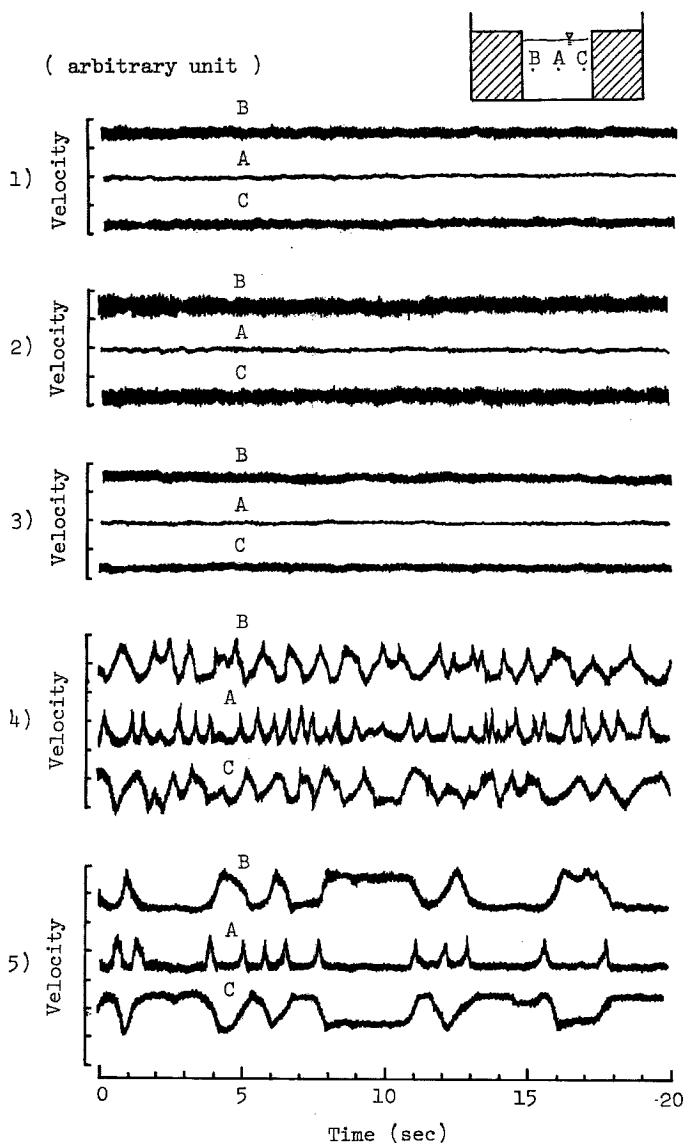


Fig. 5-3 Simultaneous velocity measurement.

の場合と同じく、 $c/B=0.37, 0.82, 1.71, 2.62$ および 4.42 の 5 通りが選ばれている。

速度の計測結果を Fig. 5-3 に示したが、これよりつぎのことが知れる。すなわち、 $c/B=0.37$ の場合、A 点においては、平均速度が大きいのにに対し、乱れ速度はきわめて小さく、明らかにこの測点は主流部であることが知れるのにに対し、B 点および C 点では平均速度は小さいが乱れ速度はきわめて大きく、水制域の影響を受けていることが知れる。同様の傾向は 0.82 および 1.72 の場合についてもみられ、 $c/B=0.82$ の場合、B 点および C 点の速度変動は、若干、 $c/B=0.37$ の場合より大きくなっているがそれほど差異はない。また、 $c/B=1.72$ の場合には、逆に速度変動が小さくなっている。これに対し、 $c/B=2.62$ および 4.42 における計測結果は、A、B および C 点のいずれにおいても、長周期の振幅のきわめて大きい速度変動の存在が認められ、 $c/B=1.72$ 以下の場合と対照的な特性を示している。すなわち B 点および C 点においては、高周波数成分の変動速度の他に低周波数成分の変動速度の存在が認められ、さらに、B 点における速度が大きい場合には C 点における速度は小さく、逆に C 点における速度が大きい場合には B 点における速度は小さくなっている。また、A 点における速度は B 点と C 点とでの速度が逆転する遷移時のときのみ大きくなり、その他では小さくなっている。ただし、高周波数成分の変動速度はいずれの点のものについても大きく含まれている。

以上の特性を蛇行現象との関連で説明するとつぎの通りである。すなわち、 $c/B=2.62$ および 4.42 の場合、大きな蛇行現象のため流れはつねに片側に偏流し、B 点あるいは C 点の速度のみが大きくなり、蛇行が変動するとき偏流の方向も変化させられ、逆側の点の速度が大きくなるとともに、それまで速度の大きかった点は後流域に入ってしまうため、その速度は小さくなる。また、A 点における速度が B および C 点の速度が逆転するときのみ大きく、それ以外で小さくなるということは、水制域がつねに A 点を包みこみ、蛇行が変動するときのみ遷移的に A 点が主流の中に入ることである。

また、 $c/B=1.72$ の場合と $c/B=4.42$ の場合とを比較すると、前者については B 点と C 点との間の速度の移行はかなり規則的に頻繁に行なわれるのにに対し、後者についてはランダム性を増すとともに一度どちらかの点に移行するとかなりの時間にわたって持続するという傾向がみられる。なお、流況観測で確かめられた $c/B=0.82$ における蛇行特性は速度計測では把握されなかったが、これは蛇行が全断面にまで及ばず測点の選定が不適切であったためと考えられる。

6. 結 論

本研究は水制の水理機能を解明するための基本として、多数個設置された越流時および非越流時における不透流水制の抵抗特性について実験的に検討したものであって、本研究により得られた成果についてまとめるとつぎのようである。

1) 流れの抵抗は、通常、抵抗係数、経験係数あるいは砂粒粗度によって表示されるが、水制を有する流れについては路床基準面の選定法などに問題が残され、いずれの表示もつねに適当であるとはいえない。

2) 越流時の水制間隔・水深曲線は 2 種の極大値によって特性づけられるが、水制長の大きさによっては 2 種の極大値の発生が明瞭に認められるとは限らず、とくに全幅水制（機型粗度）では 1 種のものしか認められない。

3) 水制を有する場合の水深および水制純間隔がそれぞれ水制の設置されない場合の水深および水制高により無次元化された水制間隔・水深曲線への水制幅あるいは位相差の効果はほとんど無視されるのにに対し、水制高の効果はかなり顕著であり、また流量が増加するにしたがい、2 種の極大値のうち水制間隔の小さな場合に現われる極大値の発生水制間隔は小さくなるが、他のものについての発生間隔はほとんど変化しない。なお、相対的な水深は流量が増加するにしたがって減少し、流量がきわめて大きくなるとほぼ一定値に近づく。

4) 水制間隔・水深曲線における 2 種の極大値の発生機構については後流域における渦の離脱に伴う流れの不安定効果ならびに後流・主流域間境界面におけるせん断力効果を含めた流況特性についての説明が必要である。

5) 非越流時の水制間隔・水深曲線は越流時と同様に2種の極大値によって特性づけられるが、その特性は水制長によって異なり、水制長が大きい場合の水制間隔・水深曲線は位相差によって顕著に変化するとともに流量の増加に伴い相対的水深は水制長に関係なく増加する。

6) 自由表面上の流況観測により、水制長が大きいとき非越流時の流れには蛇行現象の発生が認められ、水制間隔・水深曲線の極大値発生は蛇行現象と密接な関係をもつものに対し、水制長が小さい場合にはほとんど蛇行現象の発生は認められず、水制間に形成される後流域が支配的となる。

以上のように、水制間隔・水深曲線の特性より不透過水制の抵抗特性について検討したものであるが、今後においてはさらに一般的な抵抗表示法について検討するとともに、水制を有する流れの内部構造について究明が必要と考えられ、移動床上に設置された水制域周辺における洗掘・堆積現象などについても研究を進めた。

おわりに本研究の遂行にさいし実験および資料整理に終始熱心な協力をいただいた京都大学大学院生浅野富夫氏に謝意を表する次第である。

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, 昭35.10, 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) 岩垣雄一: 滑面開水路における乱流の抵抗法則について, 土木学会論文雑, 16号, 昭28.
- 4) 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, 昭34.12, pp. 17~33.
- 5) 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, 昭36.3, pp. 185~193.
- 6) 足立昭平: 流水抵抗と安定河道, 水工水理学(石原藤次郎編), 丸善, 昭47, pp. 237~263.