

II-15 透過水制工の流速減少要因に関する 実験的研究

北海道大学工学部 正 員 長谷川和義
同 上 学生員 三井 和久

1. はじめに

水制の研究は歴史も古く、多くの河川研究者の興味をひいてきた。しかし、本格的な水理学研究がおこなわれるようになった時期は比較的新しく、それも不透過のものに限られてきた。吉川¹⁾ら(1955)、秋草²⁾ら(1960)の土木研究所における研究は特に有名であり、水制建設に大きな影響を与えてきた。しかし、近年さかんに用いられている透過水制に関する研究は少なく、そのまわりの流れの状態や流速減少の機構など、基本的特性についても理論的には何も分かっている状況にある。

水制には大きく分けて二つの効果が存在すると言われる。その1つは粗度効果であり、他は水はね効果である。前者は水制を文字どおり粗度として働かせ、流れの減勢を期するものであるが、後者は流れの運動量を他に向け、水衝を避けることを期している。本研究はもっぱら前者の機能に着目して、実物水制ブロックの1/50の縮小模型を用いた実験を行うことにより、いわゆる透過・越流水制について以下の基本事項を明らかにすることを目的とする。(1)抵抗特性の不透過水制との違い、(2)透過流の性質、(3)透過流の剥離域および後流に与える影響

2. 実験の概要

2-1) 実験装置

本実験で用いた水路は、図1に示すような、幅30cm、長さ10mの鋼製可傾斜水路であり、側面がガラス張りになっている。水路床は塩化ビニール板を隙間なくしきつめ、その上に直径2mm程度の砂を粗度として一様に張り付けた。また水路の上流端、下流端に金網ガーゼ、鋼棒スリットを設定し流れを等流に保つようにした。流量は調水バルブにより設定し、三角ぜきにより量水した。この状態で水を流して流速分布を測定し張り付け粗度が $k_s=0.3\text{cm}$ であることを確認した。次に、水路床に図2のような1/50の水制ブロック模型を図3のように組合せて並べ、透過水制とし実験を行なった。

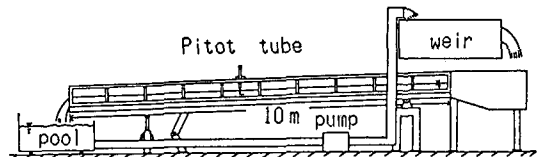


図-1 実験水路概略図

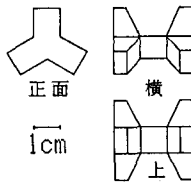


図-2 ブロックの形状

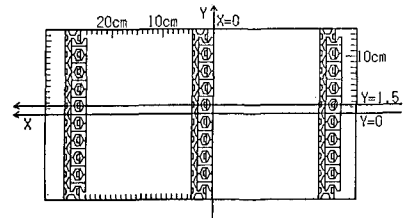


図-3 ブロックの組合せ状態と流速の測線位置(平面)

この透過ブロックの空隙率 λ_g は、ブロックを囲む直方体の体積に対する空隙体積の比率で表して $\lambda_g=0.64$ であった。

2-2) 実験条件

実際に河川で使われている水制のデータを参考に、設置間隔を図3のように水制高の10倍の25cmとした。これを水路下流端上流75cmの地点から一様に上流側に向かって31列設けた。水制長は水路幅いっぱいにとり2次元実験とした。このような研究は、棧粗度の研究に近づくものといえよう。流れの条件として水深の異なる2種類を考えた。すなわち、河床勾配を1/500の一定に保ち、RUN1は水深を水制高の2倍の5cmに、RUN2, 3, 4は水制高の4倍の10cmとした。RUN2~4は全く同じ

表1 実験条件および主要水理量

	Q(l/s)	I	H(cm)	u(cm/s)	F_r	R_o
RUN 1	1.48	1/500	5.29	9.33	0.13	3768
RUN2~4	7.75	1/500	9.97	25.9	0.26	19712

条件で3回実験を行った。実験条件および主要水理量を表1に示す。

2-3) 測定方法

流速測定は水路長のほぼ中央の箇所において、透過流(吹き出し)の強弱が両極端の様相をみせている $Y=0\text{cm}$, 1.5cm のラインで縦断方向に $X=0\text{cm}$ から 16.25cm の間で行った。これらの各点における水深方向の流速分布を得るために、垂直測定間隔を 3mm , 5mm , 10mm の3種類のいずれかとし、流速の変化の激しい部分は細かく、緩い部分は粗く測った。以下流速分布の測定点を(X座標, Y座標)のように表示する。ピトー管の圧力差は、傾斜角 10° の水マノメータを用いて、原則として5分間バランスさせた後、読み取るようにした。

3, 実験結果

3-1) 水面形

RUN1およびRUN2~4のいずれの水面勾配とも河床勾配の $1/500$ に正しく一致しており、各ケースともほぼ完全な等流状態が実現しているものと判断された。

3-2) 流れの性質

表1に示すようにRUN2~4の R_o 数の範囲は 10^4 のオーダーにある。原型との相似性、特に抗力係数の相似評価の上でいくぶんの問題があるものの極端な違いは生じない領域であり、実験の実用上の意義も十分であろう。 Fr 数 0.26 は、通常の沖積河川に一般的にみられる値である。写真-1, 2は、RUN4における流れの状況をメチルブルー溶液にて可視化したものである。写真-1より水制上流に於て流れが一時停留し、これ乗り越える流れの生じていることが判る。また、写真-2より、水制の下流側に透下流が存在しそれが乗り越え流れと共に剥離域にとらえられていることが分かる。これらを流速分布でみると以下の通りである。

3-3) 流速分布

図4~9は、それぞれRUN2, 3, 4の $Y=0$, $Y=1.5$ における流速分布の縦断変化を示したものである。極めて興味深いことに、これらの三つのケースは全く同じ水理条件にありながら異なる流速分布をみせている。すなわち、RUN2は水制下流の剥離域が不明瞭であり、逆流が見いだされない。RUN3は逆流域が存在するものの 2cm と短めであり、RUN4では 6cm という長めの剥離域が認められる。これらの差は誤差ではなく、同一平均水理条件下の異なる流れのパターンであると考えられる。分布形の違いを詳しく見る目的で、RUN2, RUN4の水制上流端直上の $(0, 0)$, $(0, 1.5)$ における分布、ならびに剥離域下流部の $(12.25, 0)$, $(12.25, 1.5)$ の分布をそれぞれ図10, 11および図12,

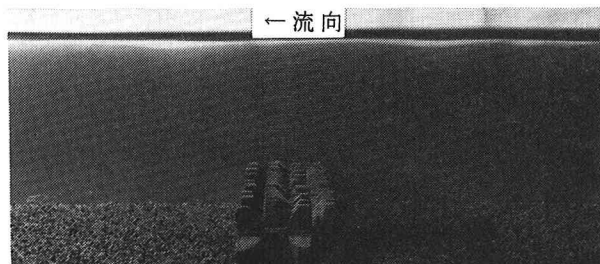


写真-1

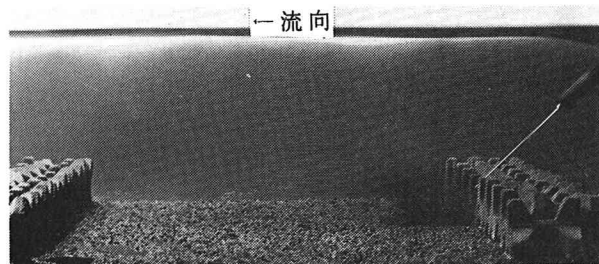


写真-2

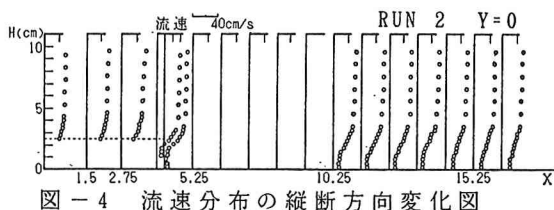


図-4 流速分布の縦断方向変化図

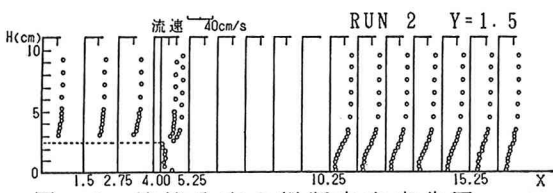


図-5 流速分布の縦断方向変化図

13に示す。剥離の弱いRUN2では水制上の流速分布がまっすぐに立ち上がり、ポテンシャルフローの様相を呈している。RUN4の分布は対数分布に近く、境界層が水面にまで達していることが窺われる。水制上の流量は明らかにRUN4が大きく、従って透過水制を通過する流量はRUN2の方が大きい。この違いは水制直下流における透過流速（吹き出し）の違いになって現れている。剥離域下流部の流速分布は、これらの影響を受けてRUN2上層に於てポテンシャル的な性質を、RUN4上層に於て対数分布的な性質を示すが、再付着後の後流域内の流速は殆ど等しくなっている。透過流速あるいは上層流速分布の2価（多価）性に関しては、5節で理論的検討を行うつもりである。

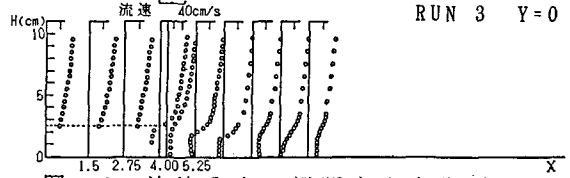


図-6 流速分布の縦断方向変化図

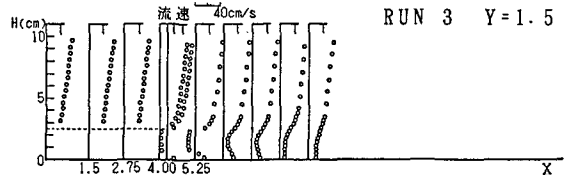


図-7 流速分布の縦断方向変化図

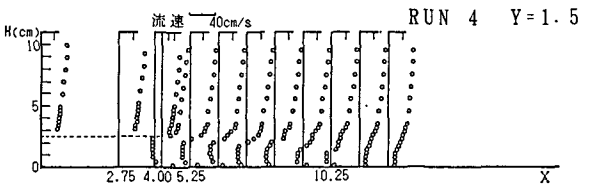


図-8 流速分布の縦断方向変化図

図-9 流速分布の縦断方向変化図

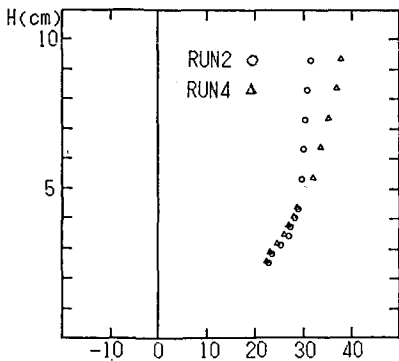


図-10 流速分布図

POINT(0,0)

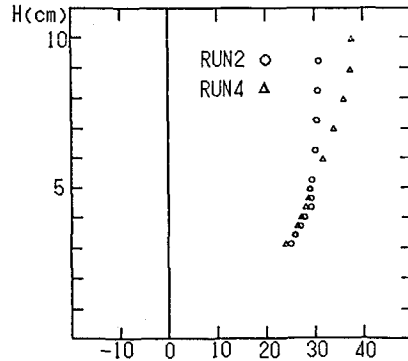


図-11 流速分布図

POINT(0,1.5)

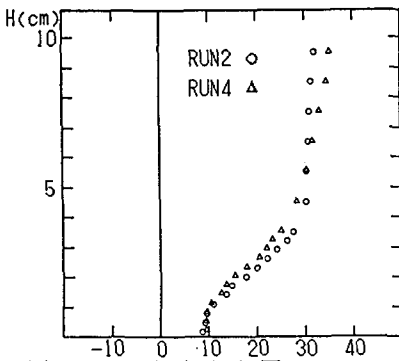


図-12 流速分布図

POINT(12.25,0)

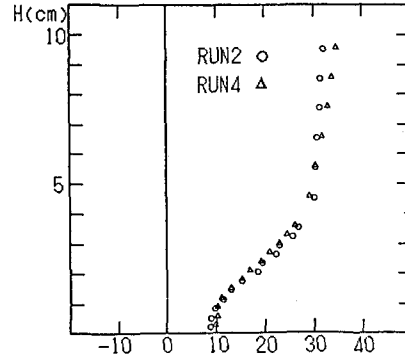


図-13 流速分布図

POINT(12.25,1.5)

4. 抵抗特性

不透水水制上の2次元流れに対する抵抗特性は、棧粗度上の流れに対するそれとほぼ同等であり、多くの優れた研究が存在する。いま、これらの結果と対比して透過水制の実験結果を見れば、透過水制の特徴を知ることができるものと考えられる。足立²⁾(1964)は、高さ5mm、幅6.4mmの長方形断面檣棒を用いた多数の実験をおこない、棧粗度抵抗に対する次の半理論式を得た。

$$\frac{U}{U_*} = 1.50 \log_{10} \frac{S}{k} - 1.91 + \left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{S}{k} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{k} \quad \dots(1)$$

ただし、 s =棧間隔、 k =棧高、 H =水深、 u_* =摩擦速度、 u =平均流速であって、上式は $8 < s/k < 160$ において成立する。

いま、今回のRUN1, RUN2~RUN4の結果を式(1)に対してプロットすると、図-14のようになる。同一条件の s/k に対する透過水制の抵抗は、同一傾向を示しつつも明らかに減少していることが分かる。今回の結果が不透水水制の特性とそれほど違わないこと（このことは抵抗の大部分が水制後部の剥離によって生じていることを予測させる）、透過流の存在が抵抗を減じていること（これは、透過流が剥離を弱めていることを推測させる）は興味深い事実であり、今後の研究に大きな手がかりを与えるものである。

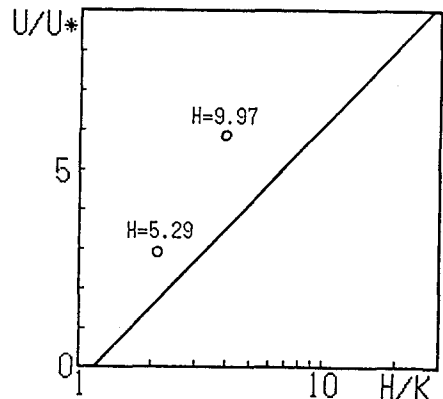


図-14 棧粗度と透過水制粗度の比較

5. 透過流速の性質

前述のように、水制ブロックに接近した流れはブロックの天端を越えるか、ブロックの中を透過する。本

実験で用いたブロックは形状が複雑なため、透過する流量を正確に知ることはできない。そこでブロックに流れ込む水の流量がブロックから吹き出す水の流量に等しいと考える。つまり、ブロック上流端 $x=0$ の天端上の流速分布からブロック上の流量を求め、全体の流量からこれを除くことによりブロックへの流れ込み流量を算定する。これがブロックからの吹き出し流量に等しいとみなすことにする。このようにして求めた透過流量と、それを透過面積で割って得た透過速度をRUN2, 3, 4のそれぞれにつき、示したものが表2である。これを見るとRUN2とRUN3の透過流速が等しく、RUN4の透過流速を大きく上回っていることが分かる。図4~9に明かなように、このことは剥離域の長さの差に関連している。ここで、図-15に示すようなモデルを考える。

表2 透過流量および透過流速

	RUN2	RUN3	RUN4
透過流量(1/s)	1.23	1.25	0.63
透過流速(cm/s)	25.6	25.9	13.0

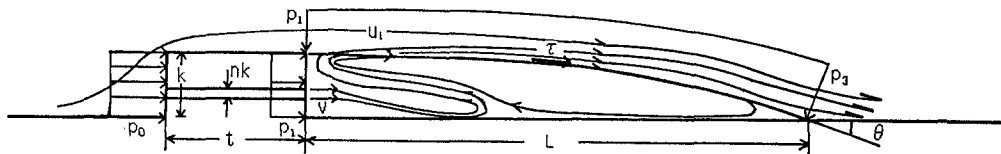


図-15 モデル、記号の定義

既述のように、水制の上流側では流れがよどみ相対的に圧力が高くなる一方、水制天端上及びこれを越えたところで圧力が下がる。透過流は、この圧力差によって発生するものと考えることができる。水

制上下流点の間でベルヌーイの定理を用いると

$$p_0(=p_3)=p_1+\frac{\rho}{2}v^2+\frac{\rho}{2}\cdot f_g\cdot\frac{t}{nk}v^2 \quad \dots(2)$$

ただし, p_0, p_1, p_3 = 静水圧と位置ポテンシャルの和からの圧力の変動分

v = 平均透過流速, f_g = 透過ブロックの摩擦係数, n = 平均透過面積率

次に剥離域に対して運動量式を適用すると

$$\rho v(u_1-v)=p_1k-\frac{1}{2}(p_1+p_3)k+\tau L \quad \dots(3)$$

ただし, u_1 = 剥離域境界線における流速, τ = 剥離域境界に働くせん断力, L = 剥離長

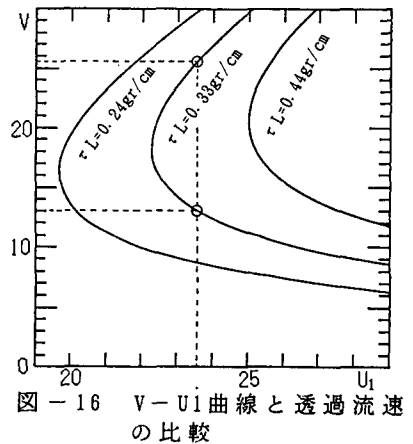
(2)式を(3)式に代入して v について整理すると

$$v^2 - \frac{u_1 n}{\left\{n - \frac{1+f_g t/(nk)}{4}\right\}} v + \frac{\tau L}{\left\{n - \frac{1+f_g t/(nk)}{4}\right\}(\rho k)} = 0 \quad \dots(4)$$

となる。上式において

$$n > \frac{1}{8}(1 + \sqrt{1 + 16 f_g t/k}) \quad \dots(5)$$

の条件が満たされれば正の2実根が存在することになる。 $f_g=0$ とみなしたときには, $n > 0.25$ がその条件となる。本実験の場合, 透過率として空隙率 $\lambda_g=0.64$ を採用ことにすれば, v が2根存在することになり, 現象の説明もできる。ここで異なる v の値をもつRUN2とRUN4の結果を用いて(4)式が本当に成立するか否かを確認してみよう。もし, これらの二つの v が解であれば, 根と係数の関係から(4)式中の不確定パラメータ u_1 および τL を求めることができる。これが妥当なものであれば, (4)式のモデルおよび流れの2価性は一応認め得ることになる。図-16は, 逆算された τL を与えて u_1 と v の関係を描いたものである(ただし $f_g=0$ としている)。2つの v を満たす u_1 は23.6cm/sであり, ほぼ妥当な値といえる。このときの τL は0.33gr/cmであり, これは水制間のせん断力の合計, $\rho g H L=0.41\text{gr/cm}$ より小さい。すなわち, 妥当な値であることがわかる。



6, $u_1, \tau L, v$ の関係および剥離についての考察

前節の v に関する2価性の結論は, RUN2, RUN4の両者において $u_1, \tau L$ が全く同じであることを前提にして得られたものである。しかし, 繰り返して示してきたように, RUN2, 4の流速分布は明瞭に異なっており, 剥離形態も全く違っている。全体の抵抗はほぼ同じであっても, せん断力の発生の仕組みが両者で異なっている可能性がある。図-16中には, τL の異なる場合の u_1 と v の関係が描き足してある。これによれば τL がRUN2, 4で互いに違う値をとった場合にも, u_1 を調節することによって同じ v を発生させることができる。つまり, $u_1, \tau L$ および v は互いに関係し合いながら(4)式を満たし, 全体の抵抗を等しくしているわけである。このことを流れの実態に則して言えば次のようになろう。透過水制下流の剥離現象は非常に複雑・微妙であり, いくつかの(あるいは多様な)せん断域の場合に応じて形成する。このとき透過流の流出運動量を規定する u_1 も対応して変化し, これらが水制上下流の異なる圧力差を生み

出す。透過流はこの圧力差によって規定されるが、自身は剥離形態すなわち、せん断力発生機構、圧力差などを変化させる。ただし、無限に多くの剥離パターンや透過流速が存在するという考えは疑問である。実際、RUN3は、RUN2と異なる剥離形態を見せながら全く同じ v をとっている。これは、 v_L と u_1 などの間にかなり明瞭な関係式があつて、とり得る v を制限していることを示唆している。いずれにしても、境界層内のより詳細な解析が必要であり、今後の課題となる。

7. まとめ

- 1) 透過水制の抵抗は同じ水理条件下の不透過水制の抵抗に比して小さいが、かなり似た性質も有している。
- 2) 同一の抵抗が生じている流れであっても、透過流速、剥離形態、流速分布の異なる別種類の流れが存在する。
- 3) 剥離境界における流速とそこに働くせん断力が流れによって一定であると仮定すると、透過流速が2価となることが理論的に示される。
- 4) しかし、せん断力、境界流速一定の仮定は成立しない可能性もあり、その場合には透過流速が多価性をもつ可能性がある。

8. おわりに

透過流が2価（多価）性を示すという事実は、学問的に極めて興味深いことがらであるが、透過水制がどの程度の流砂量を通すかという現実の問題にとっても非常に重大である。

今後、実験例を増すとともに境界層内の流れを詳しく調べ、2価性の発生要因、発生条件を明らかにしたいと考える。

謝辞

実験で用いた模型ブロックは、開発土木研究所の中津川氏によって便宜をはかっていただいたものである。記して謝意を表する次第である。

《参考文献》

- (1) 吉川秀夫・杉木昭典・芦田和男「水制に関する研究(1)」土木研究所報告第90号, 1954
- (2) 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」土木研究所報告107号, 1960
- (3) 足立昭平「人工粗度の実験的研究」土木学会論文集第104号, 1964