

透過水制における透過流量と抵抗特性

Characteristics of flow resistance and permeable velocity on a permeable groyne

北海道大学 長谷川和義 Kazuyoshi HASEGAWA
北海道大学工学部 柿崎 恒美 Tsunemi KAKIZAKI
(株)大林組 三井 和久 Kazuhisa MITSUI

Two dimensional experiments with permeable groynes were carried out and theoretical analysis was tried in order to know functions of permeable groynes. We found the fact there are close connection among three factors of mean velocity (U_1), permeable velocity through groyne (v_a) and separate length (L). v_a is depending on U_1 --- it takes two fold values corresponding to the same U_1 under the certain condition for the porosity of groyne. On the other hand, increase of v_a reduces L , and L is weakly related in U_1 .

Keywords : permeable groyne, flow resistance, permeable velocity, separation, shear flow

1. はじめに

水制の歴史は古く、その効果的な形状や設置法について多くの経験が積み重ねられてきた。近年、その機能に対して再認識がなされるようになり、設置例が増えきているようである。しかし、理論的な研究はあまり多くなく、特に透過水制に関するものはほとんど見あたらない。

透過水制は、水制のもつ二大機能（秋草ら1））である粗度効果でも、水はね効果でも、不透過のそれに対してソフトな働きをする。先端の深掘れや対岸への悪影響が少なく、容易に土砂を堆積させることができる。

こうした特性を明らかにするには、水制を透過する流れの性質、特にその流速を知ることが肝要である。透過流速の大小は、透過流砂量を規定するであろう。また、透過流が主流に対してどのような影響をもたらすかは、抵抗特性を明らかにする上で避けられない問題であろう。

本研究は予想される複雑な現象をとき明かすために、もっとも単純な2次元問題から始めることにし、実験と理論の両面から検討を加えたものである。

2. 模型組ブロックによる実験

2-1. 実験概要

三連ブロックを組んだ透過水制はポピュラーな存在である。図-1はその1/50の模型であり、これを幅30cm長さ10mの回流水路に幅いっぱい横断するように組み合わせて水制模型とした。水制間隔は、高さ2.5cmの10倍の25cmにとり、水深と流量を変えて通水した。水制の間は、径2mmの砂

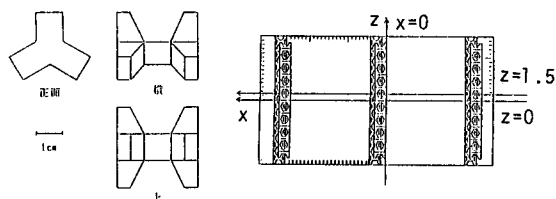


図-1 水制ブロックおよびその配置

を粗度として張り付けている。表に、各実験の通水条件と主な水理量を示す。このうち、Run-2, 3, 4は流下方向2測線に沿い、Run-K2は4測線に沿って流速の鉛直分布をビトー管により詳細に測定している。他は、透過流速のみを測っている。

2-2. 実験結果

図-2(a), (b), (c)は、各々Run-2, 4, およびRun-K2の流速分布を示したものである。既報(2, 3)のように、前二者は全く同一の条件にありながら非常に異なった流速分布を示している。図-3は、吹き出しのな

RUN NO.	Q (ℓ/s)	河床勾配	水深 (cm)	U _m (cm/s)	V _G (cm/s)	V _G /U _m	Fr	Re
RUN 2	7.75	1/500	9.97	25.9	22.0	4.97	0.26	19712
RUN 3	7.75	1/500	9.97	25.9	21.4	4.84	0.26	19712
RUN 4	7.75	1/500	9.97	25.9	13.0	2.94	0.26	19712
RUN K2	10.23	1/250	10.05	34.0	15.0	2.39	0.34	34170

ただし、Q=平均流量，U_m=平均流速，V_G=平均透過流速，U_m=摩擦速度

表 実験条件および主要水理量

— 流速 50 (c/m)

い場所でその様子を拡大して見たものである。Run-2は透過流速が大きく、上部流速の87%に達している。このため、水制下流域の剥離が消滅しているようであり、逆流が観測されない。このとき、上部流れはポテンシャル的であり、一様な流速分布が認められる。一方、Run-4の透過流速は52%にすぎず、明瞭な逆流域が存在している。上部流は対数分布的である。二つの形態はそれぞれ安定しており、一実験で両者が入れ替わって現れるということはない。水深をあげておいて所定の流量に落ち着いた場合におおきい方の流速が、逆の場合に小さい方の流速が現れやすいことが分かっているが、現在のところどちらが現れるかの推定法はない。Run-5以下の透過流速に着目した実験の結果によれば、ほぼ2:1の割合で低い方の実験が多く現れている。ただし、後に述べるように、二価が現れるには一定の条件が必要なようであり、どんな場合にもこれが生ずるわけではない。

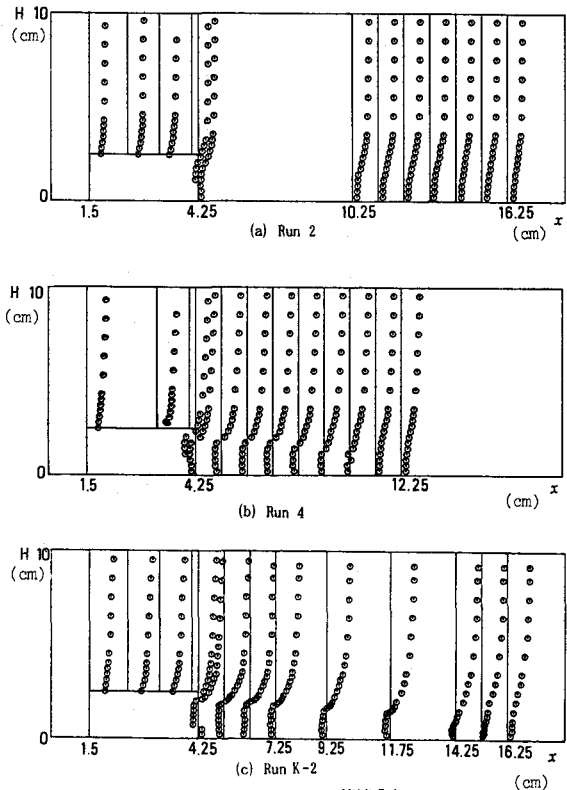


図-2 Run 2, 4, K-2における流速分布

図-4 は、流速係数と水深/水制高比の対応関係をみたものである。図中の実線は、足立(4)による棧粗度の抵抗則である。透過水制の流速係数値は、不透過の棧粗度に比して明かに大きく、抵抗の減少が認められる。また、データは対数則を基調とした足立式に平行する性質を示しており、透過流速の違いや分布形状の差異は、平均流に対してそれほど効いていないように見える。平均流速が内部流の違いによらないということの理論的な説明は難しいが、実際上の意味は重要である。同一の勾配と流量のもとで、二つの水深をとるというような事が起こらないからである。

3. 主流速分布の自由混合層モデル

段落ち流れは様々な現象の基本をなすものであり、非常に多くの研究がなされている。水制の下流域は段落ち流れに似ており、その知見を利用することができる。段落ち下流の剥離泡前半部は、低速側の速度が0の時の自由混合層と似た性質を持っている(有江・木谷(5))といわれる。

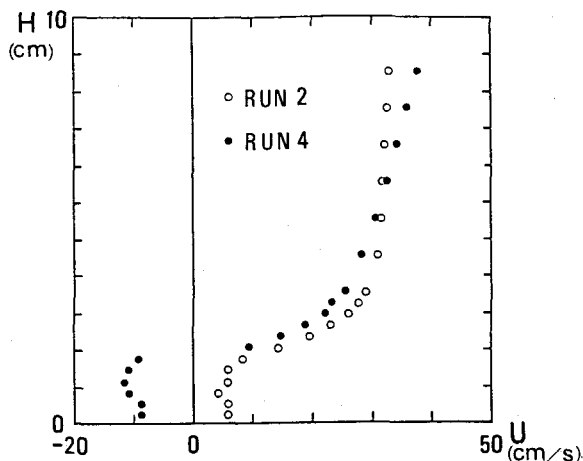


図-3 同一実験に現れた異なる流速分布

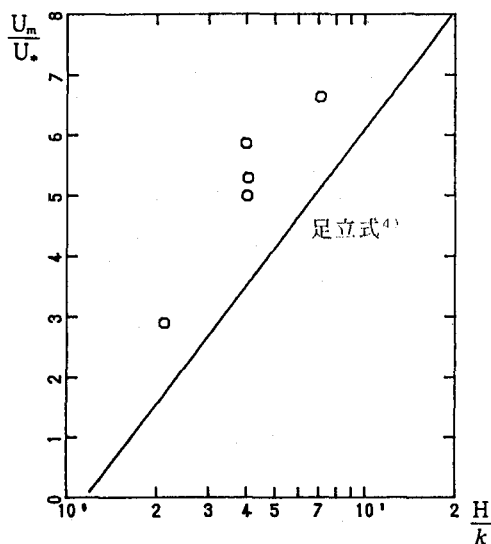


図-4 透過水制の特徴

いま、図のように軸と記号を定めると、混合層に対する表式は、次のようになる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$\varepsilon = \chi_1 c x U_1$, U_1 = 混合層の外層流速

χ_1, c = 混合距離混合層幅に関する比例定数

今の問題では、混合層の下部に底面が

存在するので、せん断中心（相似中心軸）が直線とは限らない。これを

$y = Y(x)$ とあらわすと、相似軸が、

$$\eta = \sigma \frac{y - Y(x)}{x} \quad (4)$$

と表される。ただし、 $\sigma = \frac{1}{2\sqrt{\chi_1 c}}$ 。流関数を $\psi = \frac{1}{2} x U_1 F(\eta)$ とし運動方程式(1)に代入すれば、

$$F'' + 2\sigma F F'' = 0 \quad (5)$$

となり、通常の混合層の場合と全く同じになる。これを、Schlichting(6)にならって近似解を求めると、

$$u = \frac{U_1}{2} \{ 1 + \operatorname{erf}(\eta) \} \quad (6) \quad v = \frac{U_1}{2} \left[\left\{ 1 + \operatorname{erf}(\eta) \right\} \frac{dY}{dx} - \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma}} e^{-\eta^2} \right] \quad (7) \quad \operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt$$

ただし、無限境界の条件をあたえている。一方、 $Y(x)$ は式(2)に u, v を代入し、 y について積分をおこなうことにより求めることができる。しかし、 $Y(x) = 0$ と見なしうるようであり、ここでは考慮しない。

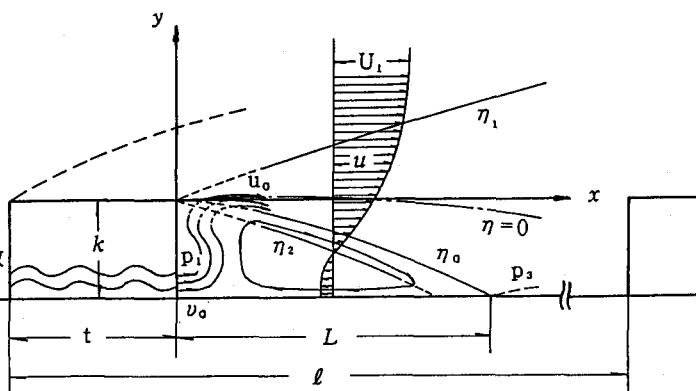


図-5 記号および軸の定義

図-6は、 $\sigma=2.3$ として式と実測値を比較したものの一例である。逆流部分を除き、水制下流の流速分布は式(6)にて表しうる。

剥離部分に働くせん断力は、近似的に $\eta=0$ における u の y 微分に εL を剰じて表すことができる。再付着点以下のせん断力に関しては、石川(7)によって詳しく調べられているが、ここではごく簡単に平均せん断力の α 倍だけが生じるものとする。両者の和が全体のせん断力とバランスしているものと考え、次式をうる。

$$\tau_0 \ell = \frac{L}{4\sqrt{\pi\sigma}} \rho U_1^2 + \alpha(\ell-L)\tau_0 \quad (8) \quad \alpha = \text{再付着点から下流域がしめるせん断力の比率}$$

U_1 は、したがって式(9)になる。平均流速との対応は、再付着点での流速分布の y 積分を H で除して式(10)のようになる。

$$\frac{U_1}{U_*} = 2 \sqrt{\sqrt{\pi\sigma} \left\{ (1-\alpha) \frac{\ell}{L} + \alpha \right\}} \quad (9) \quad \frac{U_m}{U_*} = \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} \cdot \frac{L}{H} \right) \cdot \frac{U_1}{U_*} \quad (10)$$

L がなんらかの方法で求められ、 α が仮定されると流速の推定ができる。図-7は、 $\alpha=0.4$ として $\frac{U_1}{U_*}$ と $\frac{L}{k}$ との関係を見たものである。実験値は、剥離長がさまざまな値をとっているにもかかわらず、 $\frac{U_1}{U_*}$ の変化が見られない。式(10)のデータとの不一致は、再付着点以後のせん断力の評価のまずさにあるようである。

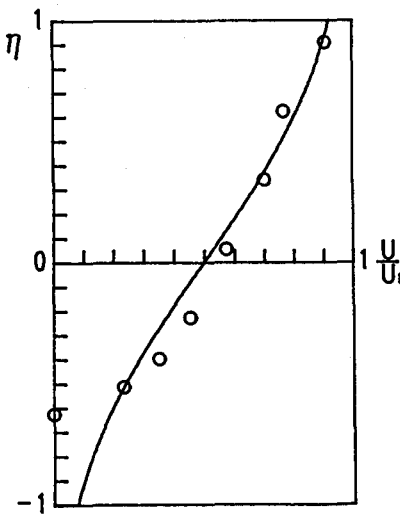


図-6 流速分布の特徴

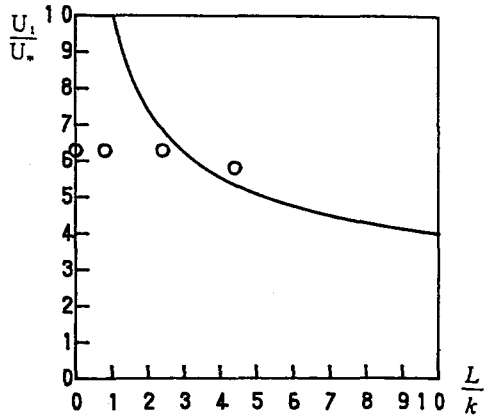


図-7 剥離長と代表流速の関係

4. 透過流の性質

水制の上下流では圧力の差が生じており、このため流れが起こる。これについてベルヌーイ式を立てると、

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + f_0 \frac{t}{nk} \cdot \frac{v_0^2}{2g} + \frac{v_0^2}{2g} \quad (11) \quad p = \text{静水圧を差し引いた圧力}$$

透過流がどのように剥離部分からながれ出るかを染料によって調べると、図-5に示すように、平均的には水制背面から余りはなれずに上部混合層に引き込まれる。

そこで、水制背面および分離流線（すなわち η_0 ）に沿って検査断面をもうけ、運動量方程式を立てると、

$$\rho v_0 k n \cdot u_0 - \rho v_0 k n \cdot v_0 = \frac{1}{2} (p_1 - p_2) k + \tau_0 \{ \ell - \alpha(\ell - L) \} \quad (12)$$

ただし、圧力分布については次のように考えている。段落ち下流・剥離泡における圧力（背圧）については、空気流においていくつかの研究があり、再付着点までは余り圧力回復が起こらないが、これを越えたところで最大値が現れることなどが知られている（Tani et al. (8)）。したがって、ここでは水制直下流で p_1 をとり、剥離終点で p_3 を受けるものとしている。

透過流の引き込みは、水制天端の混合層の始まり近くで起こるので、 $u_0 \approx U_1$ とみなしてよい。これを入れ、式(11)、(12)より圧力を消去すると、

$$N \left(\frac{v_0}{U_*} \right)^2 - n \left(\frac{U_1}{U_*} \right) \left(\frac{v_0}{U_*} \right) + \left\{ \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right) \alpha + 1 \right\} \frac{\ell}{k} = 0$$

ただし、 $N = n - \frac{f_0 t}{4 n k}$, $f_0 = 0.02$ (13)

図-8は、式(13)の $\frac{v_0}{U_*}$ と $\frac{U_1}{U_*}$ の関係を描いたものであり、データは透過流速の測られている実験値を載せたものである。透過流速の二価性が十分説明できる。この方程式が、有意の正実根をもつためには条件が必要であるが、ここでは触れない。

5. 透過流速の剥離長におよぼす影響

透過水制流れの問題を閉じるには、透過流速と剥離長の関係が必要である。不透過状態の剥離長が Λ である流れの場合、透過流がはいると、図-9に示すように、剥離長が L に後退しその点でただけ分離流線が下がる。この変化幅を通る流量が透過流量 $v_0 n k$ に等しいと考えると次式になる。

$$v_0 n k = \int_{-\zeta}^{-\zeta+\ell} u dy \approx c \frac{U_1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(-\sigma \frac{k}{\Lambda} \right) \right\} \cdot \zeta \quad (14)$$

Λ = 不透過の場合の剥離長、

$\zeta = (1 - \frac{L}{\Lambda}) k$ なので、式(9)とともに代入すれば、

$$\frac{v_0}{U_*} = \frac{f}{n} \sqrt{\sqrt{\pi} \sigma \left\{ \left(1 - \alpha \right) \frac{\ell}{L} + \alpha \right\} \cdot \left(1 - \frac{L}{\Lambda} \right)} \quad (15)$$

ただし、 $f = c \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(-\sigma \frac{k}{\Lambda} \right) \right\}$ である。図-10は、 $f = 1.2$ $\Lambda/k = 8$ として上式の関係を描いたものである。単純なモデルの割には、また式(9)の不十分さの割には実測に近い関係をあたえているようである。

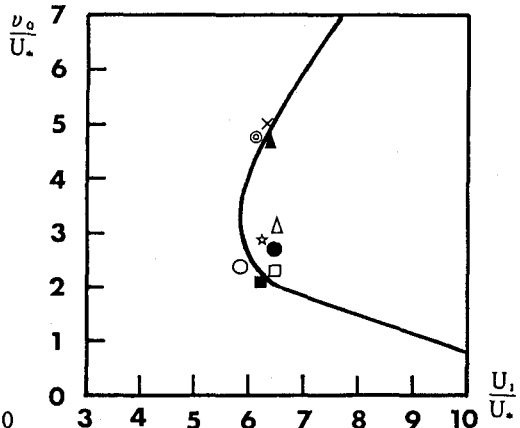


図-8 透過流速と代表流速の関係

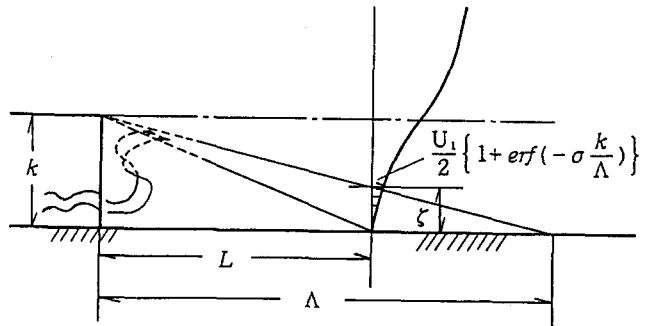


図-9 透過状態の概念図

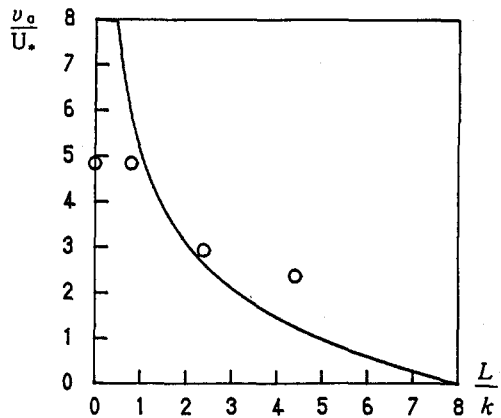


図-10 透過流速と剥離長との関係

6. 考察とまとめ

1) 式(9), (13), (15)を連立させると、 U_1/U^* , v_0/U^* , L のいずれもが、独立変数 $1/k, n$ だけで表わされうる。ちなみに、 v_0/U^* についてまとめると、この変数だけの6次の ($(v_0/U^*)^2$ に関して3次の) 方程式が得られる。しかし、解は一つだけであり二価性が現れなかった。このことは、式(9)が実際からはなれているところに原因がある。逆に、 v_0/U^* が U_1/U^* に対して二価性をもち得ているのは、 U_1/U^* が L に対して独立に近い状態にあるからともいえる。

2) 透過水制の粗度効果が、剥離長や透過流速に関係しにくいということは、その効果を予測する上で非常に有利なことである。従来の不透過粗度の研究を利用することができよう。

3) 透過流速の二価性は式(13)で表すことができ、解の存在条件を指定できる。しかし、いずれが生ずるかはいぜん明らかにできない。

4) おおよその剥離長は、式(15)で推定できる。

5) 剥離域の流速分布は、式(6)で近似的に表しうる。

《参考文献》

- 1) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和夫・土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告107号，1960
- 2) 長谷川和義・三井和久：透過水制工の流速減少要因に関する実験的研究，土木学会北海道支部論文報告集，1989
- 3) 長谷川和義・三井和久：透過水制工の水理特性に関する実験的研究，土木学会第44回年次学術講演会概要集，1989
- 4) 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
- 5) 有江幹男・木谷勝：「流体力学の進歩境界層」（谷一郎編）4章，丸善株式会社
- 6) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory (Sixth Ed.) Chapt. XXIV, McGraw-Hill
- 7) 石川忠晴：断面急変に伴う剥離領域の下流部の流れと底面せん断力について，土木学会論文報告集第257号，1977
- 8) Tani, I., Iuchi, M., Komoda, H.: Experimental investigation of flow separation associated with a step or a proov, Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, Report No.364. 119-36, 1961