

洪水流の横断方向流速差がもたらす付加的抵抗の評価

Added Flow Resistance of Flood Flow due to Lateral Velocity Discontinuity

東京工業大学工学部 福岡捷二 Shoji FUKUOKA
建設省土木研究所 ○藤田光一 Koh-ich FUJITA

Laboratory tests were performed to evaluate the lateral momentum transfer between two flow regions having different velocities. In the tests, media with very high porosity were put on a part of a test channel in such a manner that lateral discontinuity in velocity was made. The experimental results showed that the mixing coefficient f expressing intensity of the momentum transfer changed remarkably depending on the position, width and permeability of the porous media. On the basis of the mechanism of fluid exchange between the two regions, prediction methods of the mixing coefficient f were developed.

Keywords: Flood flow, Flow resistance, Lateral momentum transfer, Vegetation

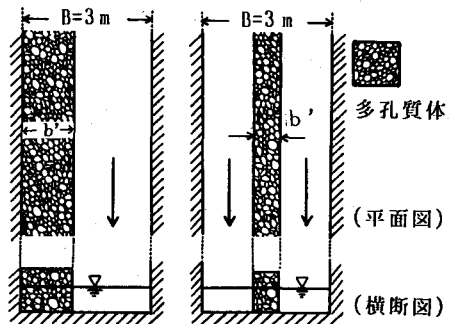
1. はじめに

洪水流においては、横断方向の河床高の違いや植生、構造物の存在によって、横断方向に大きな流速差が生じる。このような流速差は、活発な運動量の交換を横断方向に起こし、洪水流全体の流水抵抗や横断方向の流速分布に大きな影響を与える場合がある。本研究は、このような現象を考慮した抵抗、流速分布の予測手法を開発することを目的として、代表的な運動量交換発生パターンを持つ横断方向流速差が流れに与える影響を定量的に明らかにしようとするものである。

2. 研究方法

横断方向の流速差が原因となって生じる付加的流水抵抗については、複断面河道の場合^{1), 2), 3)}、底面粗度が横断方向に不連続に変化する場合⁴⁾、樹木が水路中央や片側にある場合^{5), 6)}などの基本的な流れのパターンについて、その予測手法が検討されている。しかし、実河道においては、河岸（堤防）の存在や底面粗度、横断方向のスケールなど横断方向流速差に伴う運動量交換を支配するいくつかの要因があり、それらが変わると付加的流水抵抗特性が変化すると考えられる。したがって、実用的な抵抗予測手法を開発するためには、これらの要因が流水抵抗に与える定量的な影響を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、水理条件を制御しやすい水路実験により、上記の要因と運動量交換特性との一般的な関係について検討を行なう。なお、本研究では、2次元現象を対象を限定し、複断面水路の低水路と高水敷の河床段差などに起因する3次元現象を伴う運動量交換現象は対象としない。以下に、実験方法を示す。

洪水流は、湾曲部の河道を除いて、水深に比べて幅の大きい2次元平面流で近似することができる。そこで、幅がひろく(3m)、実河道と同じように水深に比べて幅の大きい2次元平面流を作ることができる一様幅、一様勾配(約1/1000)の直線水路(長さ48m)を用いて実験を行なった。実験においては、水路内の一部に表1に示す空隙率の非常に大きい水深以上の高さを持つ多孔質体を設置して等流状態となるよう通水を行な



配置Ⅰ 配置Ⅱ
図1 多孔質体の配置方法

表1 実験に用いた多孔質体

名称	空隙率	抵抗則	透過係数K
b	97%	$v_w = K \cdot I_e^{1/2}$	0.96 m/s
c	91%	$v_w = K \cdot I_e^{1/2}$	0.38 m/s

・ v_w : 見かけの平均流速, I_e : エネルギー勾配
・ いずれの多孔質体も、プラスチックの糸がからみあったもの

い、流量と水位、横断方向の流速分布の測定を行なった。測定対象とした流れは、開水路流れに比較して大きな抵抗を受ける多孔質体内の流れとその外側の流れとの間に大きな流速差を持つため、この実験により、横断方向に流速差を持つ流れの特性を簡単に調べることができる。実験には、図1に示すように、流れ方向に一樣の幅を持つ多孔質体を用い、配置方法（水路の片方の側壁に接して置く場合—配置Ⅰ，水路の中央に置く場合—配置Ⅱ），多孔質体の幅 b' ，透過率 K （多孔質体の種類）を変えて実験を行なうことにより、種々の要因が横断方向の運動量交換に与える影響を調べた。

2. 多孔質体内外の流れの干渉

図2，3に、多孔質体が水路の片側に置かれた場合（配置Ⅰ），中央に置かれた場合（配置Ⅱ）それぞれの横断流速分布を、代表的な場合について示す。これらの図から、多孔質

体外の領域（以後、主流部と呼ぶ）内で多孔質体に近い領域では、顕著な速度欠損が生じていることがわかる。このことは、多孔質体内の遅い流れと主流部の速い流れとの干渉により、主流部の流れが減速させられていることを示している。また、図2と図3を比較すると、配置Ⅱの方が速度欠損領域の幅が大きいことがわかる。このことは、水路中央に多孔質体が置かれた場合の方が干渉効果が大きくなることを示している。写真1，2は、図2，3それぞれに対応する流況を、一定時間間隔での連続撮影により表したものである。配置Ⅰの場合には、

多孔質体内の遅い流体（白い染料の部分）が主流部に流出し、主流部の流れと混合して

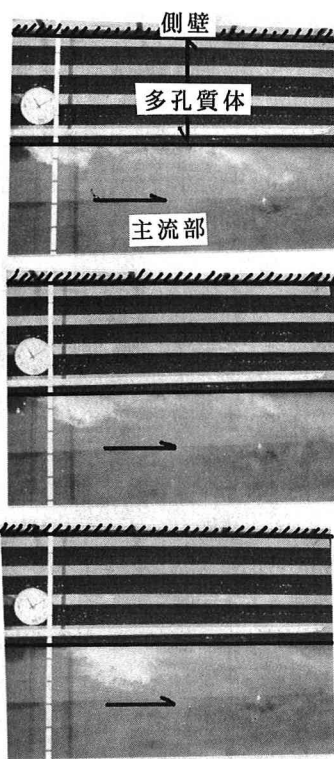


写真1 配置Ⅰの代表的な流況
（水深8cm, $b'=123$ cm, 撮影間隔1秒）

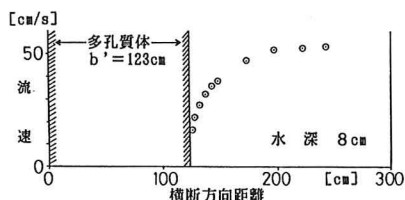


図2 横断流速分布(配置Ⅰ, $b'=123$ cm)

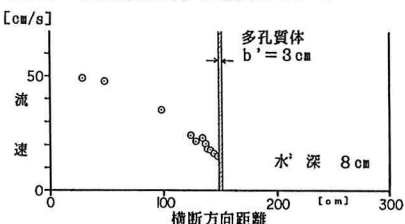


図3 横断流速分布(配置Ⅱ, $b'=3$ cm)

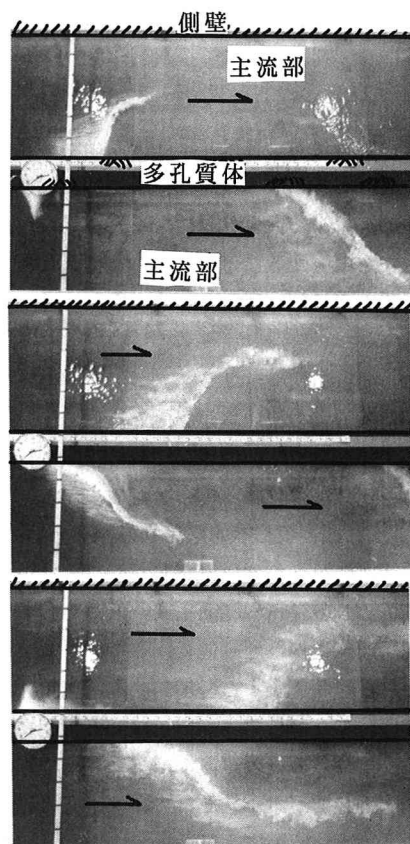


写真2 配置Ⅱの代表的な流況
（水深8cm, $b'=30$ cm, 撮影間隔3秒）

いることがわかる。配置Ⅱの場合には、多孔質体内に投入された染料が左右交互に周期的に流出していることがわかる。また同時に、この流出流を補償するように主流部から多孔質体への流入が交互に行われている。また、多孔質体を横切る流れが生じている場所は、一定の速度で下流に進行している。この結果、多孔質体をはさんで、左側の主流部から右側の主流部へ、また右から左へという周期的な流れが生じ、この横方向の流体移動のパターンが全体として一定速度で下流に進行するという流況が現われる。多孔質体内から主流部

へは、主流部の平均流速に対して非常に小さい流下方向速度を持つ流体が流出するため、多孔質体が左右の主流部へ遅い流体を放出することになり、水路全体の抵抗が増大することになる。配置Ⅱの混合特性は、基本的には、石川らのかん木模型を用いた実験で見られた混合現象⁵⁾と同じであると考えられる。

3. 干渉効果の定量的な評価

干渉効果は、遅い流体と速い流体がある境界を挟んで互いに混合する現象である。マクロに見れば、複断面水路における高水敷上の流れと低水路内の流れとの境界に作用するApparent shear stress⁷⁾の考え方と同様に、多孔質体内外の境界でせん断力が作用すると考えることができる⁸⁾。(図4参照) そこで、干渉の水理的影響を、図4に示すように、多孔質体内外の境界に作用するせん断力 τ により表現する⁸⁾。速度差のある流体間に作用するせん断力は、一般に、次の形で流速差と結びつけられる⁴⁾。

$$\tau = \rho f (\Delta u)^2 \quad (1)$$

ここでも、上式の形を用いる。ここに、 ρ :水の密度、 Δu :多孔質体内外の流速差、 f :干渉の強さを表わす境界混合係数、である。 f 値が明らかになれば、主流部の流れについての力のつり合いを考えることにより、水路全体の抵抗を予測することができる^{6), 7)}。そこで、本実験の結果を用いて f 値を求めた。 f 値の算出にあたっては、まず、マンギの抵抗則が横断方向の各位置で成立すると仮定して、主流部の横断流速分布から主流部各位置の底面せん断力を求め、得られた底面せん断力の合力と主流部の流れに作用する重力の流下方向成分との差が境界でのせん断力 τ に等しいとして τ を求めた。次に、得られた τ より(1)式を用いて f を求めた。この時 Δu は次式より求めた。

$$\Delta u = \bar{u}_m - K I_b^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}_m$ は主流部の平均流速である。 $K I_b^{1/2}$ は、干渉が及ばない領域における多孔質体内部の流速を意味する。多孔質体内の平均流速は、主流部の流れから加速されているため $K I_b^{1/2}$ よりも大きい。にもかかわらず $K I_b^{1/2}$ を用いたのは、多孔質体から流出する時の流速が実質的な運動量の交換に寄与しており、この流速が多孔質体内の平均流速よりも小さく、むしろ $K I_b^{1/2}$ に近い値を持っているとの考えに基づいている。

実河道においては、植生などの多孔質体の幅 b' に比して川幅 B が十分大きく、対岸の存在(B)が横断方向の運動量輸送にほとんど関与せず、 b' 自身が直接影響を与える。したがって、得られた f 値と多孔質体の幅 b' との関係が重要となる。配置Ⅰ、Ⅱについて、 f と b' との関係を図5にまとめて示す。図より以下のことがわかる。配置Ⅰの場合には、 b' が0から増大するにつれ f 値が急激に増大し、やがて f 値の増大率が小さくなり、ほぼ一定の f 値に近づく。これは、 b' の巾が小さいと、多孔質体内外の流体の出入りが多孔質体側の壁によって拘束を受け、流体の混合が抑制されるためである。また図より、多孔質体の透過係数 K が大きい程 f 値が大きいことがわかる。このことは、透過係数 K も流体の横断方向の出入りに影響を与え、 K が小さいと多孔質体内外の出入りが生じにくくなるため、 f 値が小さくなると推定される。一方、配置Ⅱの場合には、 b' が小さくなるにつれて f 値が急激に大きくなり、またその値は、多孔質体が片側にある場合に比較してはるかに大きい。したがって水路中央に位置する幅の狭い多孔質体は、幅のわりには大きな影響を主流部に与えることになる。 b' が大きくなると、 f 値が一定値に漸近する傾向を示す。配置Ⅰ

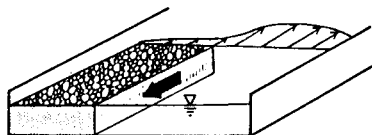


図4 多孔質体内外の境界に作用するせん断力 τ

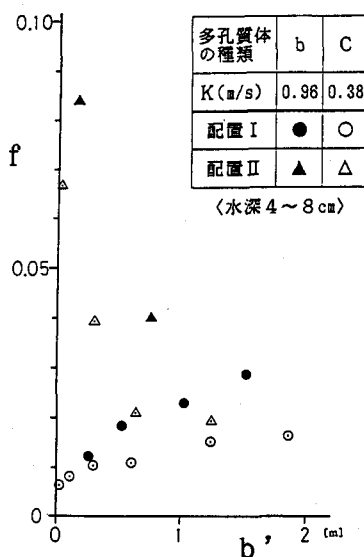


図5 f と b' との関係

の場合と同様、透過係数 K が大きい方が f 値が大きくなっている。以上から、境界混合係数 f 値は一定ではなく、配置方法と b' 、 K によって大きく変化すること、配置ⅠとⅡの抵抗特性は互に全く異なり、その一般的な表現方法についても異なる考え方に基づいて検討する必要性が明かとなった。

4. 境界混合係数 f の一般的な表現

4. 1 多孔質体が水路の片側にある場合(配置Ⅰ)

境界混合係数 f 値を変化させる b' 、 K のいずれも、横断方向の流体の混合を抑制することに関係する諸量であることから、 b' 、 K 、すなわち多孔質体設置側の側壁と多孔質体の透過性の低さに起因する混合抑制効果が評価できれば、 f 値の一般的な表現法が得られる。 b' による混合抑制効果については次のように考える。 b' が充分大きければ多孔質体内には図6に示すように、主流部の流れによって加速される領域(多孔質体内の混合領域)が存在する。今この領域の幅を表わす代表長さを L_w とする。 b' が L_w に対して充分大きい場合には、側壁の存在が混合を抑制することがなく、一方、 b' が L_w よりも小さくなると、側壁による混合抑制効果が卓越してくると考えられる。 $b'=0$ となると、多孔質体がなくなり、多孔質体内外の境界は通常の側壁に一致する。この時の f 、すなわち $f_{b'=0}$ は固体壁の抵抗則から推定して、 $f_{b'=0}=F_b/2$ (F_b :側壁の摩擦損失係数)にほぼ一致する。以上のことから、多孔質体側の側壁の存在による f の減少は、 $(f-f_{b'=0})/(f_{b'=\infty}-f_{b'=0})\sim b'/L_w$ という2つの無次元数間の関係により表現できると考えられる。ここで、 $f_{b'=\infty}$ は $b'=\infty$ の時の f 値であり、具体的には、 b' が充分大きく b' による f 値の変化がなくなった時の f 値を指す。多孔質体内の混合領域の幅を代表する長さ L_w は、次式により与える。

$$L_w = \sqrt{hK/4g \cdot f_{b'=\infty}} \cdot \sqrt{2gh/F_m - K} \cdot \{(8F_mgh)^{-1/4} + \sqrt{K/4gh}\} \quad (3)$$

ここで、 h :水深、 F_m :主流部の摩擦損失係数、である。上式は、多孔質体内の横断流速分布 u_w を次式で表す場合に現われる β_w の逆数 $1/\beta_w$ に相当するものであり、石川らの方法⁴⁾に準じて求めた。

$$u_w = (u_b - u_{w0}) \exp(\beta_w \cdot y) + u_{w0} \quad (4)$$

ここで u_b :多孔質体内外の境界における流速、 u_{w0} :干渉を受けていない領域での多孔質体内流速、である。以上に示した考え方が妥当かどうかを調べるため、前出の実験データをもとに、 $(f-f_{b'=0})/(f_{b'=\infty}-f_{b'=0})\sim b'/L_w$ 関係を調べた。結果を図7に示す。図より、 $(f-f_{b'=0})/(f_{b'=\infty}-f_{b'=0})\sim b'/L_w$ には、ほぼ一意の関係があることがわかる。したがって、 b' 、 K が f 値に与える影響は上式によって一般的に表現できると考えられる。

次に、 K 値が f に与える影響について考察を行う。図7に示されたように、 b' が f に与える影響は、 K 値が異なっても概ね推定できることが示された。したがって、 K が $f_{b'=\infty}$ 値に与える影響が明らかとなれば、 f 値の一般的な表現が可能になると考えられる。 K が $f_{b'=\infty}$ に与える物理的な影響は次のように考えることができる。 K が ∞ の場合には、横方向の混合を多孔質体の抵抗が阻害することはなく、自由乱流、す

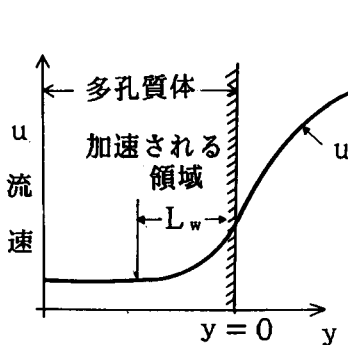


図6 多孔質体内の横断流速分布の特性

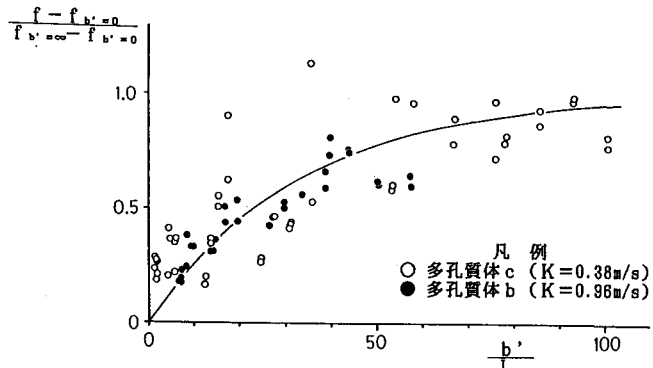


図7 $\frac{f - f_{b'=0}}{f_{b'=\infty} - f_{b'=0}}$ と $\frac{b'}{L_w}$ との関係

なわち流速の異なる流れが平行に合わさった時に、それらの境界で生じる混合現象に一致する。一方 $K \rightarrow 0$ になると、多孔質体が壁と同じ性質を持ち、 $f_{b'=\infty} \approx F_b/2$ を用いることができよう。 $K=0$ と ∞ との間の $f_{b'=\infty}$ 値については、さらに検討する必要がある。

4. 2 多孔質体が水路の中央にある場合(配置Ⅱ)

4. 2. 1 混合機構

図8は、多孔質体と左右の主流部との境界近傍での水位変動と、片方の境界近傍における流下方向と横断方向の流速変動(V_x , V_y)を示したものである。図より以下のことがわかる。まず、水位、流速とも周期的な変動を繰り返している。多孔質体左右の水位は、同じ波形で位相が π 程度異なる時間変動をしている。このため、多孔質体左右で周期的に横断方向の水面勾配が現われる。例えば、地点2の水位が地点1の水位に対して大きくなると、地点2から1への水面勾配が生じ、この水面勾配に対応して V_y 、すなわち地点2から1への横断方向の流速が生じる。このことは、多孔質体左右の水位差の周期的な変動が、多孔質体を横断する周期的な流れを起こすことを示している。 V_y が正、なわち多孔質体からの流出があると、その地点の流下方向速度 V_x が大巾に減少し、逆に V_y が負になると V_x が増大することがわかる。このことから、多孔質体から流出する流体は、写真2からも指摘したように、非常に小さな流下方向流速を持っており、一方、多孔質体へ流入する流れは、50cm/s程度の主流部の平均流速とほぼ同じ流下方向流速を持っていることがわかる。多孔質体からの遅い流体の流出があると、その流出に少し遅れて、流出した側の水位が急激に大きくなる。これは、流下方向に運動量をほとんど持たない流体が多孔質体から流出したために、水位がせき上げられることにより起こる。以上に示されたように、多孔質体が水路中央にある場合には、

多孔質体左右での水位差の発生→横断方向の水面勾配の発生→横断方向の流れの発生→多孔質体からの遅い流体の流出→流出した側の水位の増大→多孔質体左右での水位差の発生

という一種の自動的な現象が生じ、これが干渉による抵抗増加の原因となる。なお、このような自動的な現象は、多孔質体が水路の片側に置かれた場合にも生じており、ここで示した水位・流速の時間変動測定と同様の測定により確認されている。多孔質体が水路中央にある場合には、多孔質体の左右両方で水位変動が生じるため、横断方向の流体移動が片側に多孔質体がある場合に比較して活発になる。このため、こうした現象がより明確に現われる。

4. 2. 2 f を支配する無次元水理量と f 値との関係

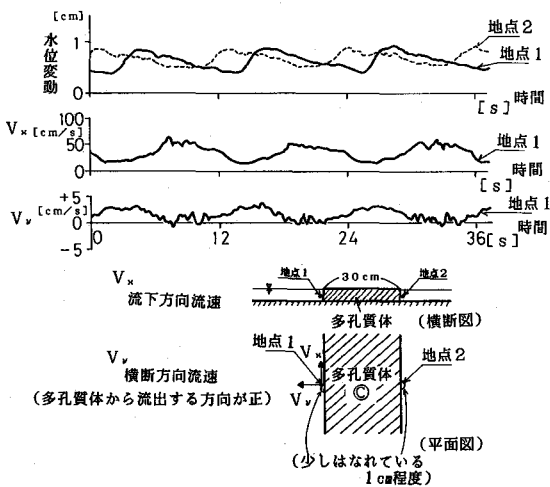


図8 多孔質体近傍の水位、流速変動
(配置Ⅱ,水深8cm, $b'=30\text{cm}$)

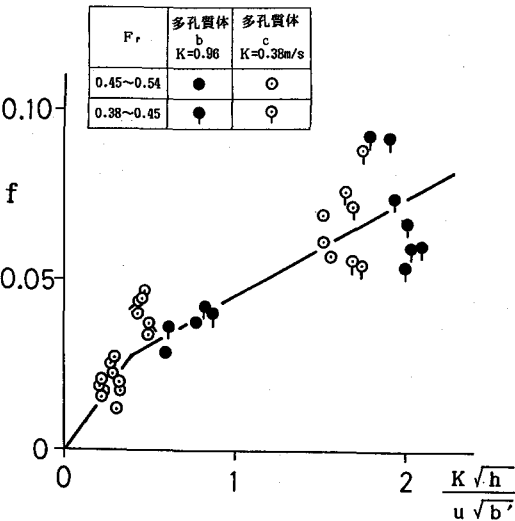


図9 f と $K\sqrt{h}/(u\sqrt{b'})$ との関係

ここでは、現象を単純化してとらえ、水位の時間変動と横流入速度の時間変動それぞれの振幅だけに着目することにより、混合係数 f の決定機構について考察する。今、主流部の水位変動の振幅を Δh とし、また横流入流速の振幅を v_o で表わす。安定した混合が存在する場合の Δh と v_o との間には、下式に示されるように、主流部のフルード数 F_r ごとに、一意の関係があると予想される。

$$\Delta h / h = F(F_r, v_o / u) \quad (4)$$

ここで、 u ：主流部の平均流速、 F ： $\Delta h \sim v_o$ 関係を表わす関数、である。一方、 Δh と v_o には、大ざっぱに考えれば、下式に示す関係があると考えられる。

$$v_o = K \sqrt{I_T} = K \frac{\sqrt{\Delta h}}{\sqrt{b'}} \quad (5)$$

(5)式と(4)式を用いて若干の変形を行なうことにより次式が得られる。

$$\left(\frac{v_o}{u}\right)^2 \cdot \frac{b' u^2}{h K^2} = F(F_r, \frac{v_o}{u}) \quad (6)$$

境界混合係数 f は、その物理的意味から、 v_o / u に比例すると考えられるので、上式は、混合係数 f がフルード数と $K\sqrt{h} / (u\sqrt{b'})$ という無次元パラメータに支配されることを意味している。

以上の考察結果の妥当性を明らかにするため、実験結果から $f \sim K\sqrt{h} / (u\sqrt{b'})$ 関係を調べた。結果を図9に示す。図9より以下のことがわかる。データにはややバラツキが見られるものの、全体的に見ると $K\sqrt{h} / (u\sqrt{b'})$ の増大に伴い f が増大するという明確な関係が見られる。また、本実験で設定した F_r 及び K 値の範囲では、 $f \sim K\sqrt{h} / (u\sqrt{b'})$ 関係に与える K 値及び F_r 数の影響は小さい。これらのことから、図9から見る限り、 F_r が同じであれば、 f が無次元パラメータ $K\sqrt{h} / (u\sqrt{b'})$ に支配されるという考えが妥当であると判断できる。以上によって、多孔質体が水路の中央に置かれた場合の混合係数 f を一般的に表示する方法が得られた。図9に示された定量的な関係については、さらに広い条件下での実験結果の追加及び解析的検討を通して、その妥当性の確認を重ねて行く必要がある。

5. 結論

①多孔質体内外の境界では、周期的に多孔質体からその外的主流部に向う流れとそれと逆方向の流れが生じ、このため、内外の流れは干渉し、活発な運動量の交換が発生する。②この運動量の交換量は、水路の片方の側壁に接して多孔質体が置かれた場合には、多孔質体の幅 b' が大きくなるほど大きくなり、水路の中央に置かれ両側に主流部がある場合には、 b' が小さくなるほど大きくなる。また、後者の運動量の交換の程度は前者よりも大きい。また、多孔質体の透過率が大きくなると運動量の交換は活発になる。③上記の運動量の交換は、多孔質体内部から流出する流れが主流部を堰き上げ、このために生じる多孔質体内外の水位差が再び多孔質体内外の横断方向の流れを誘起するという自励的現象が原因となって起こる。④境界混合係数 f によって運動量交換を定量的に表現することができる。実験結果とそれに基づく混合機構に関する物理的な考察により、境界混合係数 f を支配する無次元水理量が得られ、 f 値と無次元水理量との定量的な関係が得られた。

参考文献

- 1) 福岡捷二ほか：複断面河道における洪水流の抵抗特性，第30回水理講演会論文集，1986。
- 2) 福岡捷二・藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集(投稿中)。
- 3) 玉井信行・河原能久：複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究，第25回水理講演会論文集，1981。
- 4) 石川忠晴ほか：開水路平面せん断流に関する実験的研究，第39回年講Ⅱ部，1984。
- 5) 石川忠晴・田中昌宏：開水路中のかん木の抵抗特性に関する研究，第31回水理講演会論文集，1987。
- 6) 福岡捷二ほか：樹木群の流水抵抗について，第31回水理講演会論文集，1987。
- 7) Myers, W.R.C: Momentum Transfer in a Compound Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 16, No. 2, 1978.