

粗面薄層流れの乱れ構造と抵抗則について

山 口 大 学 正 斎 藤 隆
 ○ 住 宅・都 市 整 備 公 団 正 岡 田 武 司
 日 本 道 路 公 団 正 朝 日 理 登
 (株) 鴻 池 組 正 小 松 久 詩

一般に、流れの抵抗則として Prandtl-Kármán の対数分布則が広く用いられているが、 $h/ks < 10$ の流れすなわち、粗面薄層流の様な、全体の流れ場に占める壁面領域の割合が大きい流れにおいては、この対数分布則は成立しないことが知られており、対数分布則の適用を考えた仮想壁面位置は、著者らの従来の研究より、勾配相対水深、深さ方向により変化する複雑なものであると判明した。従って、流れの抵抗則を導く手段として対数分布則を適用させることは困難であると考え、本研究では、流れ場に影響を及ぼす壁面領域における乱れ特性を調べ、栗原が指摘する乱流底層の存在を確認した上で、実測の流速分布より得られる滑動粘性係数より抵抗係数を求め、普遍的な抵抗則の検討を行なった。

実験には、長さ 8.6 m、幅 41 cm の鉄製長方形断面水路に、粗度要素として平均粒径 1.35 cm の軽量骨材を密に貼り付けたものとを用いた。流速分布は横断方向の平均化を考慮して扁平ピトー管を、乱れ速度 (u' , v') は X 型熱線プローブを用いて計測した。乱れの統計量は、シグナル・アナライザーにより、データ個数 4,000 個、周波数 0.2~1 KHz で処理した。

乱れエネルギーの生成量と粘性による消散量を勾配則に示したのが図-1 である。ここで、乱れエネルギーの生成量は、Reynolds 応力と速度勾配の積より、また粘性による消散量は、 u' の自己相関係数から得られる Taylor の最小渦径より求め、それらの差より乱れエネルギーの拡散量とした。この図より、乱流底層と粗度程度の高さまでとすると、その範囲内においては乱れエネルギーの生成量と粘性による消散量とがほぼ釣り合っていると考えられ、栗原が混合距離と再検討した際に提案した、乱流底層内では生成された乱れエネルギーは拡散されることなしに粘性の作用により消散されるとの仮定は妥当なものと判断される。

実測 Reynolds 応力の分布から、せん断力分布は直線分布であるとし、実測速度分布から求めた速度勾配を用いて計算した滑動粘性係数分布の一例が図-2 である。

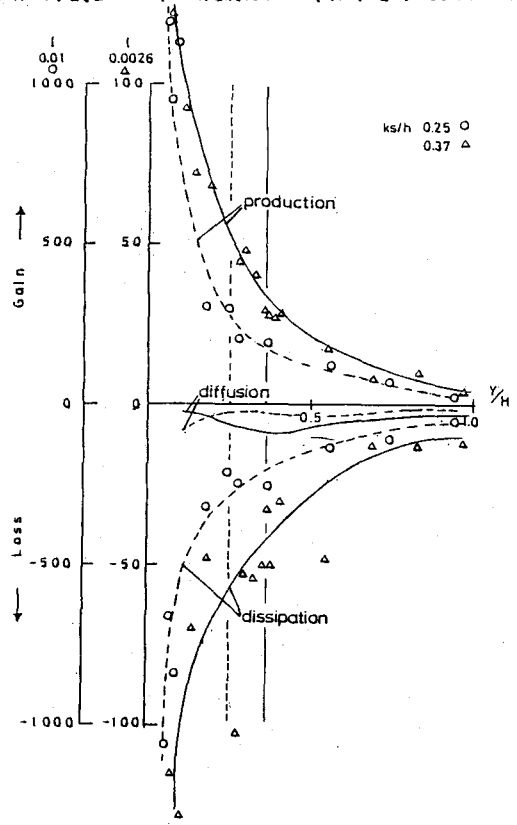


図-1 乱れエネルギーのつりあい

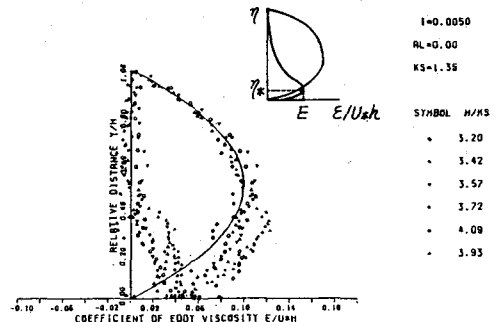


図-2 滑動粘性係数の分布

図中左側の描点群は、上述の値から対数分布則から逆算される滑動粘性係数の値と差引いたものである。この描点群をみると、壁面近くで最大値をもつ分布となっている。最大値の出現位置 $\eta^* = y/\delta$ ，ならびに最大値 $E = \varepsilon/u^*\delta$ を読み取り、 δ_s/δ に対して描点したものが図-3、4である。図中の実線は、 δ_s/δ が充分小さい場合、栗原が提案した乱流底層厚さに漸近する最も単純な図中の式の計算値である。実験描点が少なく、図中の式の妥当性については今後更に実験的に検討する必要がある。

粗度表面には粘性層が存在することを考慮して、平均的流れ場を、粘性底層 ($\eta \leq \eta_1$) と粗度に起因する乱れによる付加滑動粘性係数が最大値となる粗度領域 ($\eta_1 \leq \eta \leq \eta^*$) ならびにその上部の領域 ($\eta \geq \eta^*$) に分けて考える。付加滑動粘性係数の分布は更に検討を要するが、 $\eta_1 \leq \eta \leq \eta^*$ 間では2次曲線分布、 $\eta \geq \eta^*$ では3次曲線分布を仮定すると、平均流速分布式が得られ、更に水深方向に積分して平均流速式が求まる。この様にして求まる平均流速分布式ならびに平均流速式には粘性底層厚 η_1 が未知数として残されている。上述の様に求めた流速分布式を $E \rightarrow 0$ ， $\eta^* \rightarrow 0$ とし簡略化した式と Nikuradse の実験結果と Prandtl-Kármán の分布則で表わしたものと比較して求めた η_1 で計算した抵抗係数値と図示したものが図-5である。図中の描点は実験結果で、 δ_s/δ を一定にした実験が困難なため断定はできないが、両者はオーダー的には一致していると言える。

図-6は、上述の簡略化した式と石原らが滑面薄層流の実験に立脚して提案した河床勾配をパラメータとして含む平均流速式との比較から求めた η_1 を用いて計算した結果を図示したものである。図中の描点は実験結果である。すなわち値が小さい粘性底層厚 η_1 が抵抗係数に支配的役割をもつことを考慮すると、計算値と実験値とは数値的、傾向的にかなりよく合っているものと考えられる。

粗度に起因するとみられる付加滑動粘性係数の分布については現在検討中である。

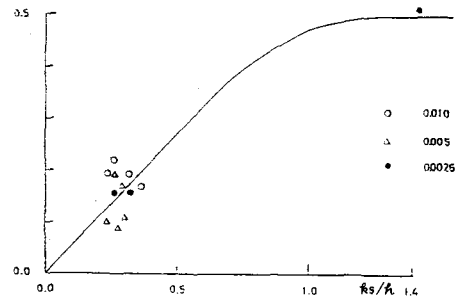


図-3 η^* と δ_s/δ との関係

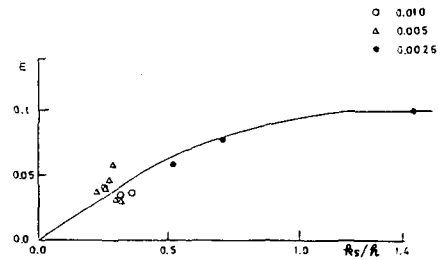


図-4 E と δ_s/δ との関係

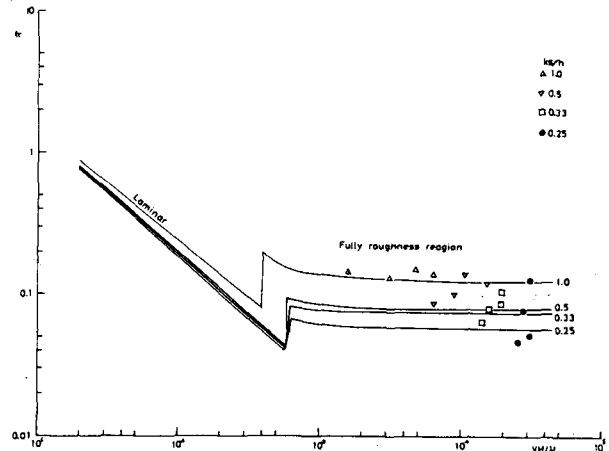


図-5 相対粗度をパラメータとした抵抗係数

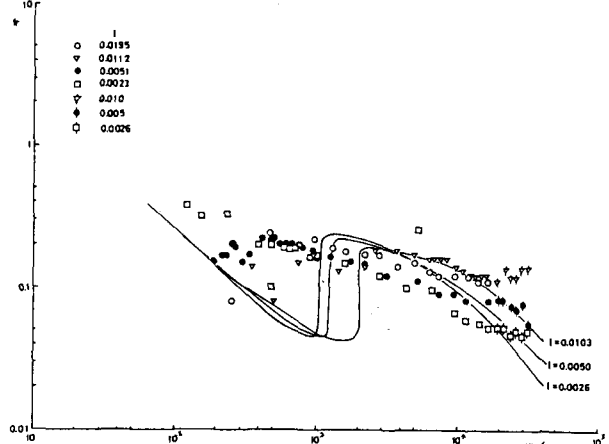


図-6 勾配をパラメータとした抵抗係数