

II-168

開水路段落ち部下流における乱流構造の変化に関する研究

建設省 正員 天野 邦彦
 京都大学工学部 正員 禰津 家久
 京都大学工学部 正員 中川 博次

1. まえがき 段落ち流れは、図-1に示すように堰や水門周辺などに見られる断面急変により生起する局所流であり、剥離を伴う高せん断流の典型例として研究されてきた。¹⁾ 著者らは、開水路段落ち流れに関する基礎的知見を得るために研究を続けた結果、その平均流特性、運動量、平均エネルギーの変化、せん断応力や圧力分布についての特性が、運動方程式に基づいて明らかにされた。²⁾³⁾ 既報²⁾において述べたように段落ち後の流速分布の回復過程には、長い距離が必要であること、また、水深変化が非常に大きな役割を果たしていることが明らかになったため、本研究では、計測区間を前回より長くし、またフルード数を大きく変化したケースについて乱れエネルギーの収支に注目して乱流構造の変化を考察する。

2. 実験装置及び方法 長さ10m 幅40cmの長方形断面直線水路の上流端から7m下流に高さ $H_s=1$ cmの段落ちを設け実験を行った。表-1に実験条件表を示す。計測は、2成分レーザードップラー流速計をトラバースすることにより、(u, v)の流速成分に関して流下方向 $x/H_s=60$ まで18断面、鉛直方向 y に底面近傍から水面近傍まで9~27測点について行ない、各測点200Hzでサンプリングして、10000個の数値化されたデータを得た。

3. 実験結果及び考察 図-2に乱れエネルギーの収支関係を示す。乱れエネルギーに関する方程式は式(1)により与えられる。図中の値は式(1)の各項の値をそれぞれ $x/H_s=0$ での最大流速 U_{max} と H_s で、すなわち U_{max}^3/H_s で割って無次元化して得られたものである。それぞれ計測により得られたデータをもとに計算されたものであるが拡散項(Diffusion)の値には圧力変動によるものは含まれておらず、また、逸散項(Dissipation)の値 ϵ はコルゴモロフの $5/3$ 乗則が成り立つ慣性小領域におけるスペクトル値より最小2乗近似から算出した。ST-21 およびST-23 の2ケースについて解析を行った結果、ST-21 については図-2に見られるように、段落ち後、剥離流線に沿う高せん断層と乱れの発生(Production)がピークを示す位置とがほぼ一致し、また、逸散は剥離泡内で非常に大きい値をとることがわかる。逆流域($0 < x/H_s < 6$)に注目すると、拡散項が乱れの発生のピークに対応して負の値、それをはさんで水面側と底面側で正の値をとる。また移流項(Advection)は、底面から負の値をとった後、正に転じ、水面に近づくにつれ、再び減少している。以上のことから、剥離流線で形成される高せん断層で発生した乱れエネルギーは、水面方向及び底面方向に乱流拡散され、底面近傍では、このエネルギーが逸散により消費されるのに対して水面方向に拡散したエネルギーは、余剰のため、下流へ移流されるものと考えられる。ST-23 については、水深変化がST-21 に比べ非常に大きく、その分、乱れの内部構造も複雑であるが、その収支関係については、ほぼ同様の考察ができる。

図-3に式(1)のそれぞれの項について y 方向に積分した値の x 方向変化を示す。逸散のピークが発生のピークより、やや下流で現われ、また両ケースともに段落ち位置から、 $x/H_s=10$ 程度までの区間において移流項が正の値をとることからも上述の考察が妥当であると考えられる。 $x/H_s>14$ では、乱れの発生も減少し、乱れエネルギーの拡散、移流は、ほとんどなくなり乱れの発生と逸散はほぼ釣り合い、等流状態に近づく。平均流特性について今回の実験データを用いて考察した既報¹⁾においても、 $x/H_s>14$ では、流れの諸量の変化が遅くなることが示されている。常流の場合、このように断面内で積分した乱れエネルギーの変化という観点からは、段落ちによる攪乱は、 $x/H_s<14$ の区間で比較的速やかに補償され、それより下流では安定し平均流速が対数則分布に回復するまでには、非常に長い区間を必要とすることがわかった。図-4に平均エネルギーの変化を示す。HUは運動エネルギー、HGは位置エネルギー、REはレイノルズ応力による仕事を表わしている。このうち、HGは水深変化が明瞭になるように $x/H_s=0$ での水深との差 $(h-h_x=0)\cos\theta$ をプロットし

ている。同時に段背面の圧力を静水圧と仮定して一次元解析による結果を併示した。エネルギー損失は、一次元解析による結果を見ても同オーダーであり、これは、図-2、3のエネルギー逸散が同オーダーであることと一致し、今回、解析に用いた程度のフルード数変化では、エネルギー損失には大差がなく一次元解析でも十分良く解析できることがわかった。以上のように段落ちによる乱れが、どのように発生し消費、あるいは輸送されるかが明らかになった。

参考文献 1) Bradshaw & Wong J.F.M vol 52 pp 113-135 (1972) 2) 福井ら 第30回水理講演会論文集 pp 601-606 (1986) 3) 福井ら 第40回年次学術講演会講演概要集 pp 271-272 (1985) 4) 福井ら 第31回水理講演会論文集 pp 413-418 (1987)

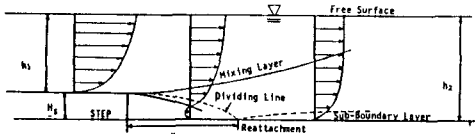


図-1 段落ち流れの概念図

Case	Re	Fr2	h2	S
ST-21	25000	0.18	12.56	1.4×10^{-4}
ST-23	25000	0.45	6.81	1.0×10^{-3}
ST-25	25000	1.40	3.20	2.7×10^{-3}

表-1 実験条件表

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \overline{u^2} \right) = -\overline{uv} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right) - \frac{\partial \overline{u^2 v}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u v^2}}{\partial y} + \left(-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\overline{q^2}}{2} \right) \overline{u} + \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} \overline{u} - \overline{u} \left(\frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial y} \right) \right) + \left(-\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\overline{q^2}}{2} \right) \overline{v} + \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial y} \overline{v} - \overline{v} \left(\frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial y} \right) \right) - \epsilon$$

(1)

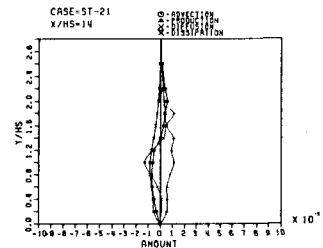


図-2 乱れエネルギーの取支

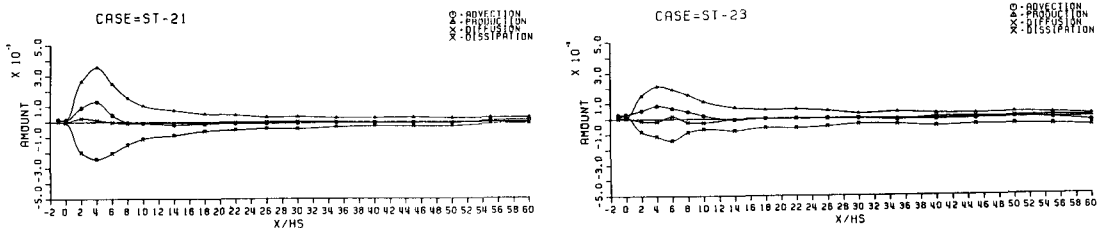


図-3 乱れエネルギーの変化

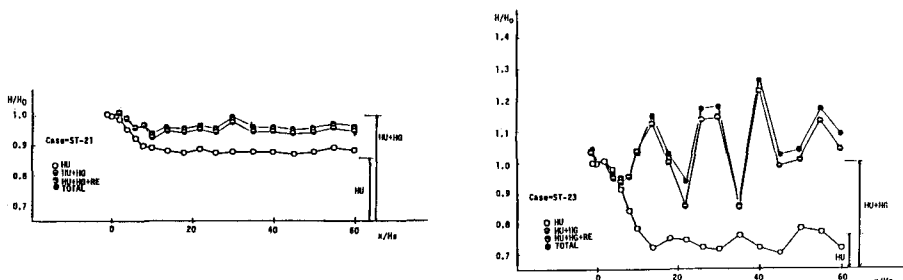


図-4 平均エネルギーの変化