

北海道開発局開発土木研究所 ○正会員 池崎 慎二
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 馬場 仁志
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 佐々木 靖博

1. はじめに

都市間を流れる急流河川には、急勾配ゆえに生じる大きなエネルギーを分散させるために、床止め工が施されているところが多い。その床止め工は、平水時において、跳水等を誘発させ、エネルギーの減少をもたらすが、洪水時において、後続部河床で大きな洗掘を受ける可能性がある。床止めは、その形状が段落ち流れを生じさせるバックステップと同様な形状をしており、以上の検討を行う上で、バックステップ周辺の流れの研究が有用な知識を与えるものと考えられ多くの研究が行われている。乱流モデルを用いた数値計算では、段落ち後方における流速と乱流成分の実験結果を良好に再現できることを示したものの、バックステップ上流部での乱流境界層の発達の違いによる後部における流れや、形状抵抗について実験したもの等が、その代表的な研究としてあげられる。しかし、これまでの研究は、実験設備を整えることの困難さから、レイノルズ数が 10^4 より小さなものに限られてきた。洪水時における床止め工後部における流れの構造の解明では、流速が数 m/sec 以上の大きさになるため、レイノルズ数は、これまでの研究において主として行われてきた、 10^4 より大きな値をとると考えられ、高レイノルズ数による実験の必要性がでてくる。さらに、これまでの研究から想像される、レイノルズ数の増加に伴う、段落ち後部から再付着点までの段落ち高さによる無次元化距離の増加等の検討を行うことは、高レイノルズ数における流れの構造を理解するためにも重要である。そこで、本研究では、実験で得られたデータのうち、4m/sec の流れにおける流速及び乱流成分の推定と既存の実験との比較を行い、さらに、高レイノルズ数における段落ち流れの再現計算も試みる。

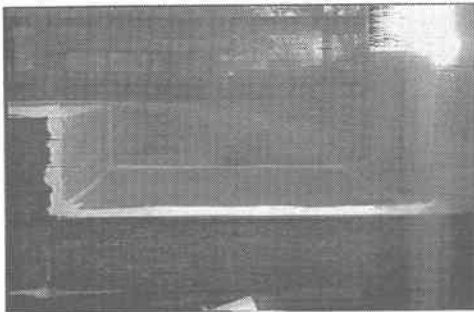


図-1 実験水路での落差工模型



図-2 実験の模様

2. 実験装置と段落ち上流部での流れ

水路の諸元は、全長 25.0m × 幅 1.0m × 高さ 0.7m であり、上流端から 10m 位置に、図 1 図中の高さ 0.15 m の段落ちを設けた。計測は、2次元レーザー流速計を用いて、水路流下方向中央の鉛直断面で行われた。なお、乱流境界層の十分な発達を促すために、高速循環水路上流端の底面と上面に、5cm × 5cm の角材を流れに直交するように設けた。

Study on Flow over the back-step with high reynolds number.

By Shinji IKEZAKI, Hitoshi BABA and Yasuhiro SASAKI

図-3 中に A 点として示された点における、管路中央部での時間平均流速分布、図-5に u' w' のレイノルズ応力を示す。それぞれの図には、実験が管路状態で行われたことを考慮して、底面付近から鉛直方向に半分の高さまでののみ示されている。さらに、流速の計測に用いたレーザー流速計の焦点距離を断面中央まで伸ばした結果、底面に最も近いデータは、底面から 0.04 m となった。本研究では図-4、5 の値を基にし断面平均流速 4.47m/sec、摩擦速度は 0.1556m/sec、段落ち高さ 0.15cm を代表スケールにとると、レイノルズ数は 2.76×10^6 であったことが分かる。実線で示される、滑らかな底面上を流れる場合の対数則を適用した場合、横軸で 800 程度しか対数則に従っていない。層流層厚が、 $\delta = 9.180 \times 10^{-7} \text{ m}$ であったことから、およそ $z=10 \text{ m}$ に対応していることになる。

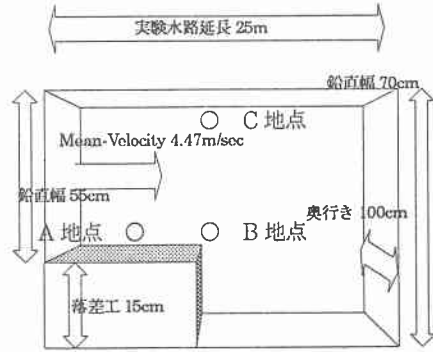


図-3 落差工模型図

図-5 のレイノルズ応力において、鉛直方向の応力の

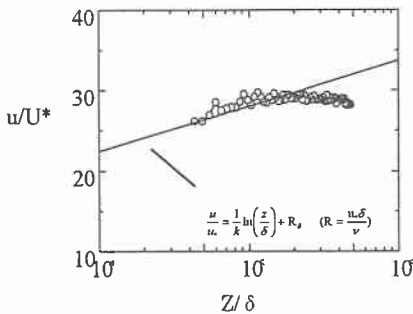


図-4 断面中央における流速分布

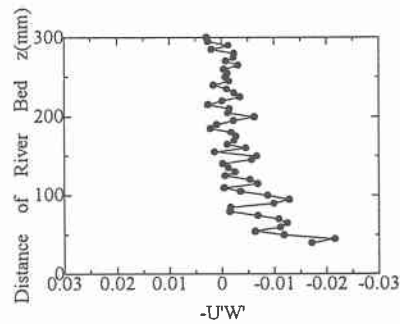


図-5 断面中央部における $-u'w'$ 分布

傾きが、およそ $z=0.10 \text{ m}$ で 2 種類に区別され、応力の変化に着目した場合に、上部域の方が傾きが緩く、ゼロに近い値を示していることが分かる。以上のことから、上流端から発達してきた乱流境界層（内層）は、A 地点において 0.10m であり、それ以上の領域は、レイノルズ応力の小さな外層内の加速を生み、裾津¹⁾により実験で得られている加速域での Log-wake の $\Pi < 0$ が計測されたものと考えられる。

3. 段落ち後の流れ

図-6 に、段落ち後における流速 u 、 u' 、 $-u'w'$ を示す。それぞれ時間平均を取っており、その間隔はおよそ 3~20 秒であった。なお、 $X/H=1$ 周辺には、ガラス補強材が位置しており、流速を測定することが出来なかった。 $X/H=1$ の流速分布に見られるように、流速の急激な変化を計測することが出来た。さらに、後述される再付着点位置は $X/H=8$ に位置し、 u' 、 $-u'w'$ の鉛直分布形状は互いに似ており、再付着点と見られる点直前でピークを示し、その後は徐々に減衰していた。これらの結果は、段落ち高さが本実験に比して小さな従来の実験（低レイノルズ数実験）において示されたものとはほぼ同様な結果²⁾を示しているが、平均流速の 2 乗で無次元化した値で、乱流エネルギー、レイノルズ応力を、例えば谷³⁾による実験結果と比較すると、その値は 3 倍にも及ぶ値となる。これは、段落ちのスケールアップ、レイノルズ数の増加に伴った、

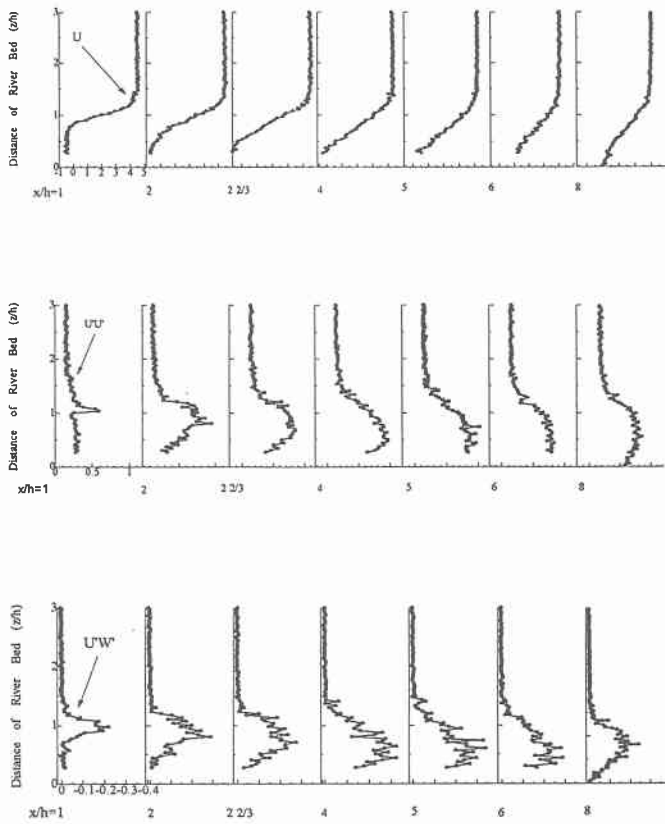


図-6 段落ち後の流速 $u, u'u', -u'w'$

大きな渦の生成、それによる乱れの増大に起因するものと考えられる。図-7に、図-3中のB,Cで示される点での乱流エネルギーのパワースペクトルを示す。特徴として、周波数 10^1 付近におけるピークがあげられる。これまでの研究で、段落ち後部における圧力低下による抗力係数はおよそ最大0.3であることが示され

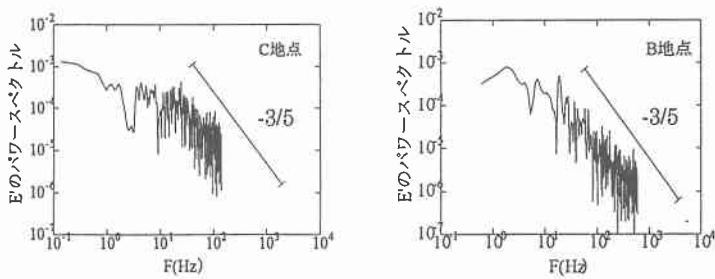


図-7 乱流エネルギーのスペクトル

ており、この値から、物体周りに生じた場合の抗力係数とストローハル数を推定すると 0.5 という値が得られる。段落ち高さを代表値として周波数を計算すると 8 となり、図中に卓越して現れた周波数とおよそ一致し、周波数 10 は段落ちにおける渦放出に伴った卓越周波数であるといえる。さらに、段落ち直後における剥離線上に位置する地点 B でのスペクトルにおいて、散逸と動粘性が平衡状態にあることを示す。-3/5 乗則が成り立っており、段落ち直後における線層内では、高波数領域で等方向性が成立していることが分かった。再付流力の検討を行うために、 $X/H=14.5$ から 1.0m毎に 5 地点の水平方向流速分布を、底面より 2.5 mm

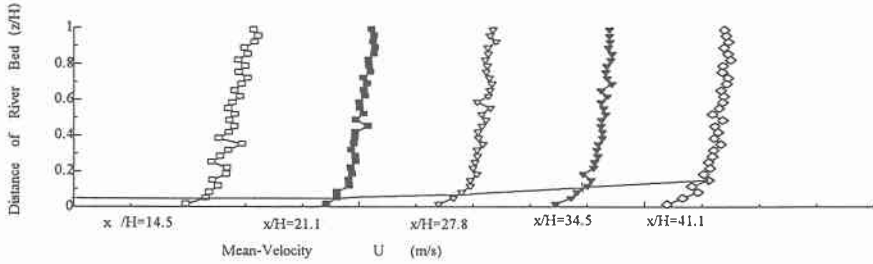


図-8 乱流境界層の発達について

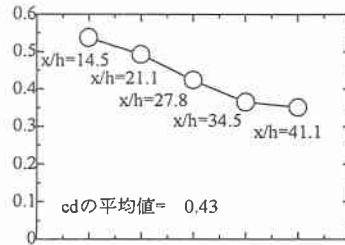
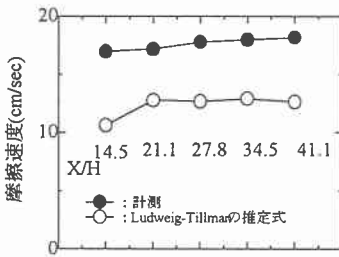


図-9 Ludwig-Tillman の推定式による摩擦速度 図-10 各断面流速分布から求めた Cd 値

離れた点から鉛直方向に等間隔で 110 点計測した。図-7 に、流速の計測結果、および乱流境界層の発達の程度を示す。段落ちによって形成されたせん断層が、ウィークとなって広がる様子が捉えられており、一方底面では、図中に示される乱流境界層が次第にその厚さを増していた。この乱流境界層厚さ変化から再付着点距離を推定⁴⁾し、 $x/h=8.0$ が得られた。図-9 に、再付着点後における Log-Law による計測摩擦速度と、Ludwig-Tillman の推定式による摩擦速度の比較図を示す。摩擦速度としては非常に大きな値をもっており、再付着点後における大きな洗掘の発生の可能性があることが分かる。⁵⁾⁶⁾図-11 にウィーク領域における流速分布を示すが解析的取扱の難しいことが考えられ、全体にわたって渦粘性係数を一定とする適用が適当でないことが分かる。図-10 は流速から求めた Cd(欠損運動量を無次元化したもの)を示す。圧力勾配による影響が $x/h=34.5$ からゆるやかになっている。

5. Navier-Stokes 式の差分法による再現計算

高速循環水路における、高レイノルズ数での実験では、その測定広さから、3次元データを得ることが困難である。計算は鉛直2次元のCIP法を含んだ解法⁷⁾を使用して、実験値の流速を初期条件に与えた。紙面の都合上詳細は省略するが詳しくは参考文献を参照されたい。メッシュ数は縦130×高さ35である。図-12に計算値の流速分布図を示す。段落ち剥離直後の流速分布形状はよく一致するが、再付着点位置については明らかに違いが生じている。再付着点に関しては、流速分布から推定した結果、 $X/H=6.0$ という値が得られた。再付着点位置に違いが認められているため、更に検討を加えたい。

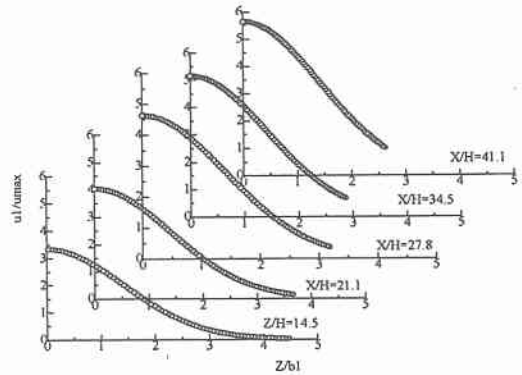


図-11 ウェーク領域の流速分布

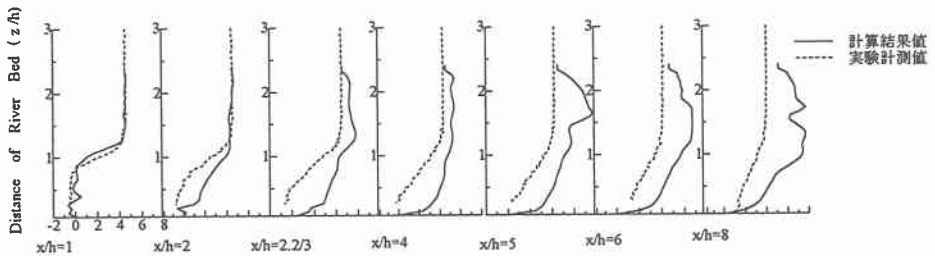


図-12 流速分布の計算結果との比較

6. まとめ

- (1) 高レイノルズ数による段落ち後方で計測される $u'u'$ 、 $-u'w'$ はこれまでの主流流速で無次元化された低レイノルズ数の実験にくらべ、3倍程度の大きさをの値をもつことが分かった。
- (2) 再付着点後の摩擦速度を得ることが出来、流速分布形状を、Schlichting の理論を用いておよそ再現することが出来た。
- (3) CIP 法を含んだ再現計算を行った結果、再付着点及び流速分布に実験値との差異が見られた。

謝辞：本研究にあたっては北海道大学長谷川和義、中山恵介先生にご指導及びご助力頂き、また、実験に昼夜にわたり御尽力をうけておこなわれた。記して心から謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 瀬津家久、中川博次、G.Scheuerer,B.Papritz-Wagner:開水路段落ち流れの乱流構造に関する実験及び数値計算、第33回水理講演会論文集,pp.469-474,1989.
- 2) 瀬津家久,門田章宏,戸田孝史,中川博次:加速流及び減速流の解析手法とその乱流特性,土木学会論文集,No509,pp.89-97,1995.
- 3) Tani,I:Experimental investigation of flow separation over a step,IUTAM Symposium on Boundary Layer Research,Freiburg,1975.
- 4) 日本流体力学学会編:流体力学ハンドブック,丸善株式会社,1987.
- 5) 吉川秀夫編著:流砂の水理学,丸善株式会社,1985.
- 6) 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,土木学会論文集,No.257,pp.21-30,1977.
- 7) パソコンによるシミュレーション物理,矢部孝他著,朝倉書店,1992.