

開水路粗度急変流における流れの遷移長に関する研究

京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄 京都大学防災研究所 正員 藤田 裕一郎
 明石工業高等専門学校 正員 神田 佳一 京都大学大学院 学生員 ○大坪 高

1. はじめに：取水堰下流に設けられる護床工の長さの決め方については、従来その複雑な水理現象のための確な解析があまり行われていない現状にある。本研究では、合理的な護床工の設計法を見いだすために、護床工区間を想定した粗度急変部において、実験と $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値解析から流れの内部特性を明らかにするとともに、粗度変化点上・下流部の粗度係数比、下流部のレイノルズ数、およびフルード数が乱れ特性の遷移長に及ぼす影響について検討する。

表-1 実験条件

実験番号	粗度条件	河床勾配 I	流量 Q (l/s)	下流部 等流水深 h_{02} (cm)	下流部等流部 摩擦速度 U_{*2} (cm/s)	流れの 遷移形態
SR-1	滑→粗	1/500	4.00	3.98	2.55	常流→常流
SR-2	滑→粗	1/100	4.26	2.52	4.95	射流→常流
SR-3	滑→粗	1/50	5.44	2.34	6.41	射流→射流
RS-1	粗→滑	1/500	3.75	2.54	2.08	常流→常流
RS-2	粗→滑	1/100	5.07	1.93	4.15	常流→射流
RS-3	粗→滑	1/50	6.21	1.85	4.22	射流→射流

2. 水面形の遷移長さ：図-1(a)~(f)は、底面粗度として半球粗度と滑面を用いた底面粗度急変場における実験結果¹⁾より水面形の変化を示したものであり、それぞれの実験条件は表-1に示すとおりである。水面形の遷移形態は主に河床勾配によって支配され、①常流から常流、②常流から射流（粗→滑の場合）あるいは射流から常流（滑→粗の場合）、③射流から射流へとそれぞれ遷移するが、その遷移長さ L_h は、粗から滑および滑から粗の場合でどちらも下流部等流水深 h_{02} の約15倍~25倍となっている。

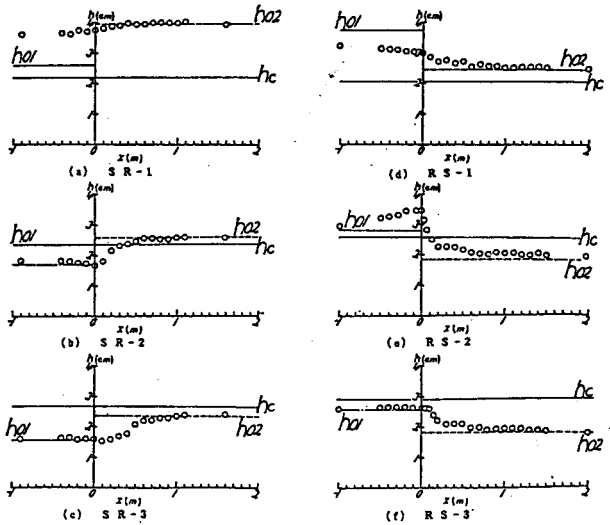


図-1 水面形の測定結果

3. 流速分布・乱れエネルギーの遷移と内部境界層の発達：図-2および図-3は、底面粗度が滑面から粗面へと変化する場合の流速分布と乱れエネルギーの流下方向変化の実験結果および計算結果の一例を示したものである。なお、計算は神田ら¹⁾の方法と同様であるのでここでは省略する。図より、実験結果・計算結果とも、粗度変化点における滑面乱流場での流速分布および乱れエネルギーが粗面上を流下するに従って底面より変化し、新たな底面粗度の影響を受けた内部境界層を形成している様子がうかがえる。この内部境界層の外側では上流粗度上の流れ特性が保存されている。次に、図-3の乱れエネルギー k の計算値より、 k の粗度変化点からの全変化量 Δk に対する各位置の変化量の比 m を、相対水深 $z/h_{02}=0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ および 0.9 について求め、

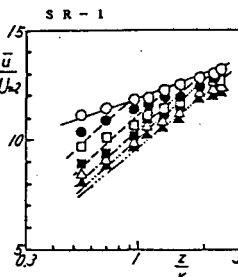


図-2 流速分布

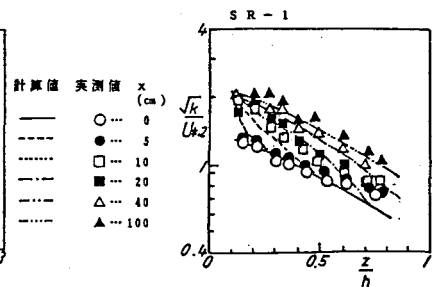


図-3 乱れエネルギー分布

Yoshio MURAMOTO, Yuichiro FUJITA, Keiichi KANDA, Takashi OHTSUBO

それらの流下方向の変化を示すと図-4のようになる。各曲線ともなめらかなS字型のカーブを描いているが、底面近傍では粗度変化直後に急激に立ち上がっており、平衡値に達するまでに必要な距離も短くなっている。また、 z/h_{02} が大きくなるに従って、 k の値が変化しはじめる位置が粗度変化点から下流側へシフトしており、平衡値に達するまでの遷移区間も長くなっている。同図より、 k の変化比 $m=0.02$ に達するまでの流下距離を内部境界層厚増加の開始距離 L 、また、 $m=0.9$ の x の値を遷移区間長 L_k とし、 L （実線）と L_k （点線）を図示したものが図-5である。同図には、Elliott³⁾による内部境界層厚の発達式（一点鎖線）および村重⁴⁾による内部境界層厚の計算結果（二点鎖線）、さらに矢田⁵⁾による実験結果から判断した内部境界層厚（○印）も示されている。これらと比較すれば、Elliott³⁾および村重⁴⁾による計算結果では、内部境界層は矢田⁵⁾の実験値よりかなり早く水面に達しており、本解析結果が最もよく実験結果と一致しているようである。また、 k - ϵ モデルでは、内部境界層が水面に達するまでの距離と前述の水面形の遷移長はほぼ対応しているようである。

4. 乱れの遷移長さ：図-6、図-7および図-8は、計算結果より求めた乱れの遷移長さ L_k を下流部等流水深 h_{02} で無次元化したそれぞれ上・下流部の粗度係数比 n_1/n_2 、下流部のフルード数 Fr_2 、およびレイノルズ数 Re で整理したものである。なお、図-6には田中⁶⁾、神田⁷⁾、および矢田⁵⁾による実験結果も示してある。これらを見れば、遷移長の支配要因としてもっとも重要なものは粗度係数比であり、フルード数とレイノルズ数はほとんど寄与していないということがわかる。また、図-6を見れば、 $n_1 > n_2$ の場合には $n_1 < n_2$ の場合よりも長い遷移区間が必要となっているが、 n_1/n_2 が1に近づくほど L_k/h_{02} は減少しており、これは神田¹⁾による実験結果と一致している。さらに、遷移長は計算結果の方が実験結果よりも長くなっており、この傾向は特に滑から粗の場合でより顕著に現れており、これには実験と計算における遷移長決定の判断基準の恣意性が一因となっていると考えられる。

5. おわりに：以上、主に k - ϵ モデルによる計算結果より粗度急変場における乱れの遷移特性を明らかにした。これらの結果に基づいて、今後、流砂の流送特性と遷移長との関連性についても検討していくつもりである。

- 【参考文献】1) 神田・村本・藤田：第33回水理講演会論文集，1989。2) Celik: Mech. of Sedi. Trans, 1982。
3) Elliott: Transactions, American Geophysical Union, Vol. 39, No. 6, 1958。
4) 村重・吉川・松梨：土木学会論文集，第261号，1977。5) 矢田：京都大学卒業論文，1989。
6) 田中：豊橋技術科学大学修士論文，1984。7) 神田・四倉：第42回年講第2部，1987。

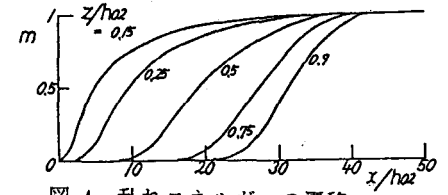


図-4 乱れエネルギーの遷移

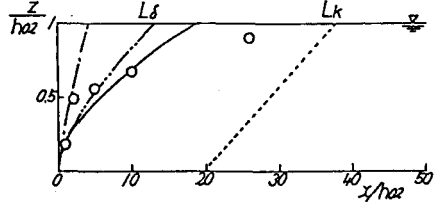


図-5 内部境界層の発達

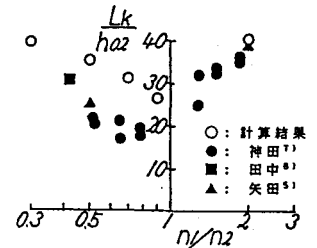


図-6 k の遷移長さ (n_1/n_2 で整理)

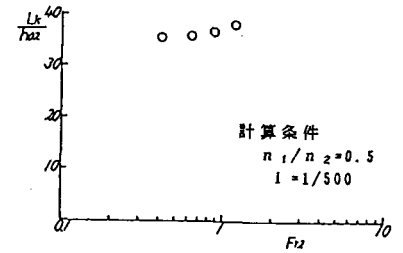


図-7 k の遷移長さ (Fr_2 で整理)

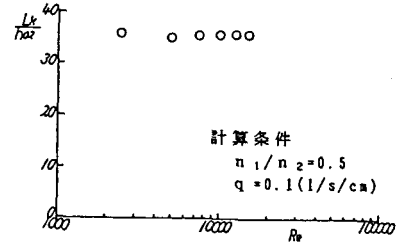


図-8 k の遷移長さ (Re で整理)