

# 折冲水流的实验及理论分析\*

厉良辅 李占松

(郑州工学院水利及环境工程系)

**摘要:** 本文阐述了折冲水流的产生过程; 针对随机折冲和进口水力要素对折冲水流的影响两个问题进行了实验研究; 最后, 对折冲水流进行了理论分析, 给出了主流折冲、主流和回流流量交换等的定量关系, 可作为分析折冲水流的一个初步数学模型。

**关键词:** 折冲水流

**中图分类号:** TV135

在平原闸局部开启时, 如若水跃跃后断面未至河(渠)道全断面, 即主流宽度只占全河道宽度的一部分, 主流就有可能偏离原来的方向呈“S”型, 或者主流在其两侧产生回流且不对称, 或者主流在沿程流速分布呈“8”字型, 这样的水流状态, 我们就称之为折冲水流。

折冲水流是平原闸闸下水流状态的特征之一, 也是造成平原闸失事的一个重要原因, 但因其产生机理及其影响因素的复杂性, 尚无文献资料进行系统研究。

## 1 折冲水流的产生过程

### 1.1 主流和回流的关系

文献[1]指出, 回流区是由一封闭流线所包围, 回流与主流之间不存在质量交换, 文献[2][3]认为, 回流与主流之间存在质量交换, 回流区不是一条封闭流线所包围, 这是形成回流的重要原因, 文献[4]对此进行了严密的理论分析, 笔者认为, 文献[2][3][4]的观点无误。

我们在实验中对此进行了专门的观察。

首先发现: 回流区区域的大小对于不同的水深是不同的。越接近水流表面回流区长度越大, 即回流区流线在平面上并不完全是闭合的。与[4]的理论分析相符。

其次观察到: 在对称突扩渠道中, 离起始断面愈远回流区宽度渐小, 在侧墙与主回流分界线交点处, 水流行至侧墙时, 部分动能转化成位能。而在下一时刻, 水流在局部压差的作用下离墙而去。此过程往来复去。如若我们把主回流分界线与明渠侧墙交点至突扩起始断面的距离, 称为回流区长度; 那么回流区长度将是一个不确定的量。

所以, 从实验和理论两个方面都证实了认为主流和回流之间存在质量交换的正确性。

### 1.2 折冲水流产生的内在原因

渠道断面突然扩大段的流速、流向和水位是动荡变化的。这是由于大尺度漩涡影响所

\* 收稿日期: 1990-03-26

致。这种漩涡周期性地生成于紧邻突然扩大段的下游。流速、流向和水位的动荡可以通过这种漩涡的尺度和传递来解释。

所以说，在突扩边界下，主流两侧形成回流，回流和主流之间产生漩涡。主流的不稳定性正是由此影响所致。当这种影响较小时，水位和流速波动的现象存在，但不致于引起主流方向发生更大的偏折即折冲水流，但是，当这种影响较大时，产生了主流两侧回流区的不对称性，这为折冲水流的产生创造了条件。

需要指出的是，也存在着这样一种观点：考虑到水流受到柯氏力的影响可解释折冲水流的产生。其实，柯氏力对主流的影响是在固定方向上产生扰动力，而折冲水流又往往是随机的，并且，柯氏力的存在并未触及到折冲水流中主流在对称流动状态下不稳定性的实质。因此，用柯氏力并不能解释折冲水流产生的原因。

### 1.3 折冲水流的形成过程

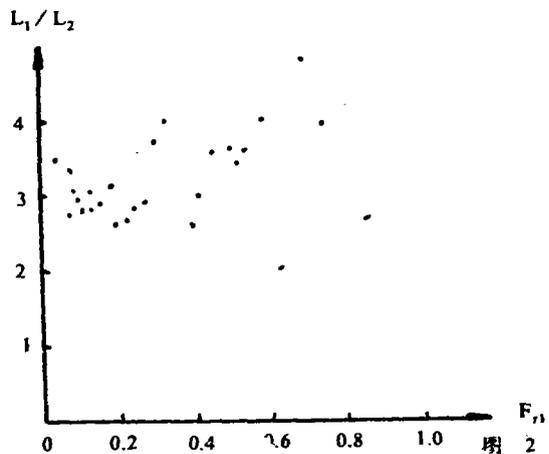
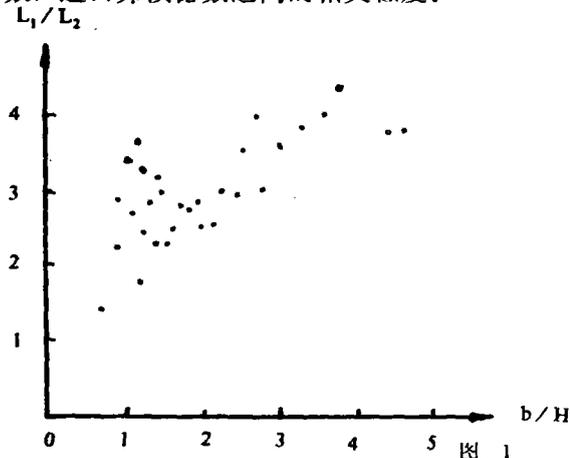
由于紊动粘性作用的结果在扩大段之初行径水流将周围一部分水体带走了。为了要保持水流的连续性，有水体流走的地方又不断地从周围补充新的水体，这样，围绕着回流区的中心就产生了附加流量的回转。

由于主回流间漩涡的影响，再加上外界的微小干扰或来流中残存的扰动，主流将不可避免地会出现局部性的波动，随同这种波动而来的是流速和压强的重新调整。在主流偏向的一侧，回流区长度小，回流区域也比较小，主流边缘剪切速度梯度较大，带走较多的流体，而补充流量相对较小；在主流偏离的一侧，情况相反。结果，由于回流区大的一侧回流水深比回流区小的一侧回流水深大，这将使扰动加剧。但也存在着另一些因素使这种扰动不能无限地发展下去，这主要是底部阻力的作用，扰动发展到一定程度之后，由于压力差（两侧回流水深不等而引起）与底部阻力的综合作用，最后形成了折冲水流状态。

## 2 折冲水流的实验研究

折冲水流的程度以特征量  $L_1/L_2$  来描述：实扩断面下游大回流区长度为  $L_1$ ，小回流区长度为  $L_2$ 。

本实验是在相同突扩比及底部糙度的情况下分析折冲水流的程度与宽深比、进口雷诺数、进口弗汝德数之间的相关程度。



在对称条件下，折冲水流是否存在的问题也是尚有争议的问题，有这样一种看法：折冲水流的产生与水流条件的不对称性等直接联系。本实验也对此问题进行针对性的分析，并得出结论。

所用实验装置为一40cm宽的水槽，平底。突扩前宽度20cm。

实测资料在  $b/H \sim L_1/L_2$ ,  $Fr_1 \sim L_1/L_2$ ,  $Re_1 \sim L_1/L_2$  坐标系中点子分布情况，分别如图1、2、3所示。  $L_1/L_2$

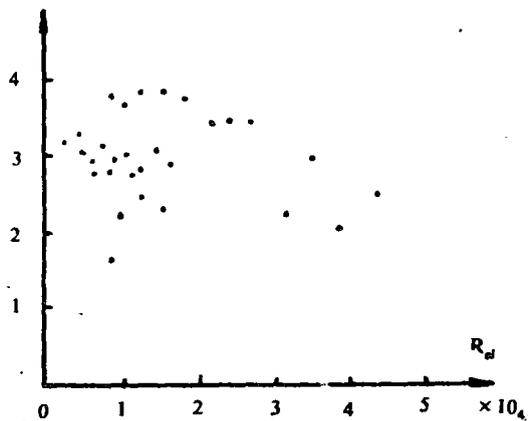


图 3

从图中可以看出： $b/H$ ,  $Fr_1$ ,  $Re_1$  的变化几乎对  $L_1/L_2$  没有影响，即  $b/H$ ,  $Fr_1$ ,  $Re_1$  不是决定  $L_1/L_2$  大小的关键。

关于随冲折冲的实验资料如下表所示

$L_1/L_2$ ①	3.03	3.48	2.74	3.18	2.53	3.65	3.18	3.37	3.47	3.53	2.67	2.70	2.66
$L_1/L_2$ ②	2.74	3.77	2.93	2.98	3.23	2.40	3.34	3.36	4.35	2.64	3.12	2.61	3.12
$10 - ②1$ ① + ② %	5.0	4.0	3.4	3.2	12.0	20.7	2.4	0.3	11.0	14.0	7.8	1.7	8.0

随机折冲现象是指对称进口条件、边界条件下，主流有可能折向一侧，也可能折向另一侧的折冲水流现象。

从实验资料可以看出，随机折冲现象是存在的，并且折冲程度也无大的差别。这说明折冲水流是在明渠突扩流动中存在的一种水流状态，它的产生是由水流的特性所决定的。边界的不对称（固定的）是引起折冲水流产生的原因之一，但不是决定折冲程度的关键。

### 3 折冲水流的理论分析

通过对突扩断面后主流运动横向动量变化的分析可得：

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{bu} (\eta_1 v_1^2 - \eta_2 v_2^2) - \frac{v}{u} \cdot \frac{gq}{c^2 h} + \frac{g}{2bu} (\eta_1 h_1 - \eta_2 h_2) \tag{1}$$

其中:  $\eta_1 = h_1/h$ ,  $\eta_2 = h_2/h$ ;

$b$ ——主流宽度;

$h$ ——主流水深, 认为沿程变化可忽略;

$h_1, h_2$ ——主流两侧回流水深;

$c$ ——谢才系数;

$v$ 和 $u$ ——分别为主流横向和纵向流速;

$$q = \sqrt{v^2 + u^2};$$

$v_1, v_2$ ——分别为回流向主流汇入水流的横向流速;

$g$ ——重力加速度常数;

导出上式的基本假设条件是:

①主流水深  $h$  在断面上无变化;

② $u$  均匀分布在断面  $b$  宽度上;

③主流具有相同的横向流速  $v$ ;

④回流汇入流量相对于主流流量来说甚小。

主流纵向流速在断面横向的分布可近似认为遵循如下公式:

先由  $x_0 = 10.4b_0 e^{k_0 x_0}$  试算出  $x_0$  值。其中:  $K_0 = \frac{g}{c^2 h}$ ,  $b_0$  为突扩前渠道宽度。

当  $x \leq x_0$  时,

如若  $|y| \leq b$ , 则

$$u = u_0 e^{-k_0 x} \quad (2)$$

如若  $|y| > b$ , 则

$$u = u_0 e^{-k_0 x} \exp\left\{-\left[|y| - \frac{b}{2}\right]^2 / 2\sigma^2\right\}$$

$$\sigma = 0.109x \quad (3)$$

当  $x > x_0$  时,

$$u_c = 2.28u_0 e^{-k_0 x} \sqrt{2b_0/x}$$

$$u = u_c \exp(-y^2 / 2\sigma^2)$$

$$\sigma = 0.109x \quad (4)$$

回流向主流汇入流速可近似如下分析:

当  $x \leq x_0$  时,

$$v_c = 0.068u_0 e^{-k_0 x} \quad (5)$$

当  $x > x_0$  时,

$$v_c = 0.155u_0 e^{-k_0 x} \sqrt{2b_0/x} \quad (6)$$

主流在回流区末端向回流所提供的流量可用下式计算:

$$Q' = \Delta \cdot h_0 \sqrt{g(h^2 - h_0^2) / 2h_0} \quad (7)$$

其中:  $h_0$ ——回流区水深, 为  $h_1$  或  $h_2$ .

$\Delta$ ——主流向回流汇入流量的水流宽度.

$\Delta$ 与回流区末端断面上横向流速分布梯度有关. 如梯度大, 则 $\Delta$ 小; 反之, 如梯度小, 则 $\Delta$ 大. 因为该梯度沿程逐渐调整变缓, 是  $x$  的函数. 那么在回流区末端断面, 可把 $\Delta$ 表示成  $L$  的函数形式:  $\Delta = \alpha L^\beta$ , 其中  $\alpha$  为有量纲量,  $\beta$  为无量纲量.

对于恒定流来说, 回流向主流汇入流量与主流向回流所提供流量相等. 由此可把 (5) 或 (6) 与 (7) 式联系起来.

关于回流区长度的确定的出发点是: 如若主流向回流提供流量在近壁处的流速等于零, 那么就认为回流区在该断面结束, 相应的  $x$  即为  $L_1$ (或  $L_2$ ). 此处流速是由主回流水位差及主流流速分布两方面决定的. 由此可把 (1) 与 (3) 或 (4) 式联系起来. 由于主回流水位差而引起主流向回流运动流速可用下式计算:

$$u = \sqrt{g(h^2 - h_0^2) / 2h} \quad (8)$$

由上述一系列式子即可对折冲水流产生过程进行分析. 至于各式详细导出过程可参见文献[5].

分析过程可以简单地描述如下:

①给出进口流速  $u_0$ , 主流水深  $h$  及  $b_0$ ,  $B$  (突扩前后渠道宽度), 谢才系数  $C$ .

②给出回流区初始不对称水深  $h_1$  及  $h_2$ .

③计算两回流区长度  $L_1$  及  $L_2$ .

④计算主流中心线偏离值.

⑤计算新的  $h_1$  及  $h_2$ .

⑥返回 (3) 计算  $L_1$  及  $L_2$ .

⑦如若  $|h_1 - h_2| > 0$ , 且两步间

$|h'_1 - h_1| + |h'_2 - h_2| < \varepsilon h$  (如取  $\varepsilon = 0.0001$ ) 成立, 则认为主流不产生折冲. 此时

$L_1 = L_2 = L$ .

如若主流中心线偏离值.

$y_2|x=L_1$  及  $y_2|x=L_2 \rightarrow +\infty$ , 则主流产生折冲.

这个过程可在计算机上实现. 我们对

$$u_0 = 0.89 \text{ m/s}, h = 0.10 \text{ m}, b_0 = 0.2 \text{ m}, B = 0.40 \text{ m}, C = 55.0 \text{ m}^{1/2} / \text{S}$$

一组数据进行了处理, 理论分析的结果与实验结果相同均为折冲.

## 4 结语

4.1 折冲水流产生的内在原因是主流与回流之间漩涡的产生, 由此引起了主流的不稳定性. 主流两侧回流的压差、底部阻力及其对比关系是决定折冲水流是否产生和程度如何的关键因素.

4.2 实验得知,  $b/H$ ,  $Fr_1$ ,  $Re_1$  对  $L_1/L_2$  几乎无影响. 随机折冲是存在的, 即边界的不对称性是引起折冲水流产生的因素, 但不是决定因素.

4.3 (1) ~ (8) 式可作为对折冲水流进行理论分析的初步数学模型.

## 参 考 文 献

- (1) Flosktra, C. The closure problem for depth-averaged two-dimensional flow, Delft Hydraulics Laboratory Report No190 (1977)
- (2) 陶建华. 环流的数学模拟及其验证. 力学学报, 第 17 卷第 1 期
- (3) Abbott, M.B. and Rusmassen, C.H, On the Numerical modelling of Rapid Expansions and Contraction in channels that are two-dimensional in plan, 17th Congr, Inter Assoc Hydr Res Vol.2.9 (1977),229-238
- (4) 李瑞生. 陈海波. 浅水环流的形成及数值模拟. 水动力学研究与进展, 第 2 卷第 2 期 (1987)
- (5) 李占松. 平原闸闸下水流状态研究. 郑州工学院硕士毕业论文, 1988 年 6 月.

## Experimental Investigation and Theoretical analysis of sinuous motion

Li Liangfu      Li Zhansong

(Department of Hydraulic and environmental engineering)

**Abstract:** firstly, the occurring and developing process of sinuous motion is discussed based on experiment data and theoretical analysis; secondly, random swing and influence of intake hydrolic factor to sinuous motion, are investigated experimentally and theoretically, finally, the fixed quantity regiven, although it is not perfect, it can acts the initial mathematical model and the reference formula in engineering design.

**Keywords:** sinuous motion.