

盲肠回流的水流运动特性

刘青泉

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文在总结和分析现有研究成果的基础上, 系统地论述了盲肠回流的形成原因和运动机理。描述了盲肠回流运动系统的物理模式。根据水槽模型试验结果, 对回流的流速分布特性、水面形态、以及影响回流运动强度的因素等进行了分析, 并近似求解了盲肠回流的平面流速场。

关键词 盲肠河段, 回流, 水流运动

1 引言

许多港口和水利工程往往具有口门开敞而内端封闭形同盲肠的河段, 如内河港池、船闸引航道、闭闸期间的引水渠首等等, 一般我们称这类河段为盲肠河段(如图 1 所示)。

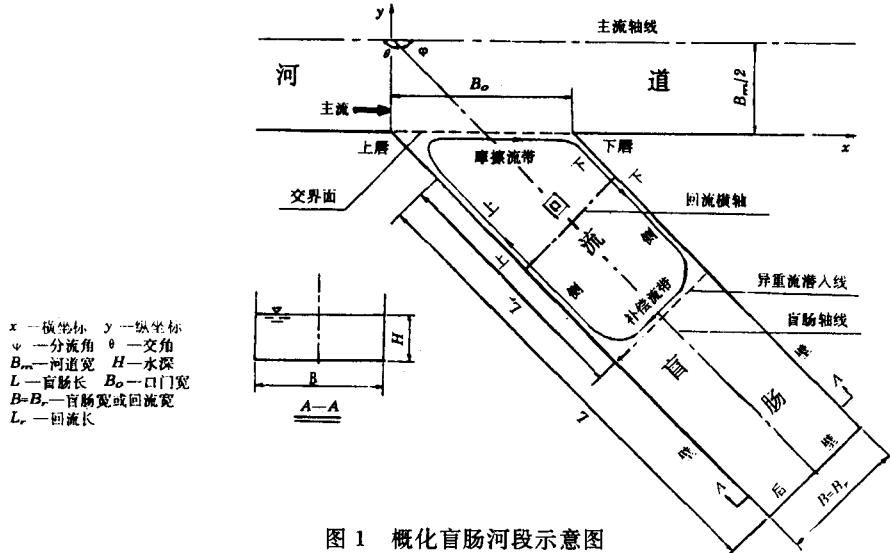


图 1 概化盲肠河段示意图

在盲肠河段口门附近普遍存在着回流运动, 且由于回流的流速远较主流速为小, 从主流扩散而来的泥沙大量在此淤积。在水利工程中, 给工程的运行带来很不利的影响^[1]。因此, 对盲肠回流的研究越来越得到人们的重视。过去的研究大多数是针对盲肠回流的泥沙淤积的, 而对回流的水流运动特性的研究却显得比较薄弱, 缺乏对盲肠回流水流运动的系统研究和认识。事实上, 盲肠回流的泥沙大量淤积, 正是由于回流运动的特殊性所引起的。因此, 全面地揭示盲肠回流的水流运动机理是十分必要的, 且问题的本身也是流体力学和河流动力学中的一个基本问题。

本文于 1994 年 2 月 21 日收到。

盲肠回流运动类似于流体力学中的空腔流运动，但是由于盲肠回流具有自由水面，使问题变得更为复杂。本文是综合作者过去的有关研究写成的。除列举了丰富的现象和资料外，特别是着重于物理模式的描述、机理的阐述以及规律的分析。

2 盲肠回流系统的物理模式

2.1 盲肠回流的平面形态

盲肠回流的平面形态近似一椭圆形，沿着椭圆形的流线轨迹，水流历经交界面-下壁-后壁-上壁-交界面作环形旋转运动(如图 2 所示)。

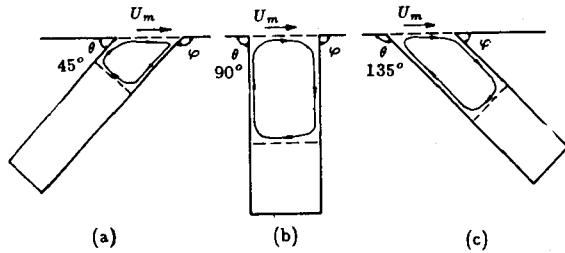


图 2 盲肠回流平面形态示意图

盲肠回流的平面形态和尺度具有一定规律性。除了主流速很小时，可能会出现不充满口门宽的回流外^[2]，一般地，回流始终充满整个口门。在交界面上，由涡体横向掺混引起的两侧水体的交换在平均意义上是等量的，不存在横穿交界面的净流量。由于盲肠口门的水流运动，始终伴随着大尺度涡体的产生、掺混和消失，因而主、回流交界面是一波动的不规则界面，但时均情况下，则是稳定不变的，与口门几何界面近似重合。

盲肠回流总是占据着一定的平面尺度。当边界条件一定时(盲肠长度足以使回流充分发展)，回流尺寸几乎不随主流流速 U_m 和水深 H 而变，即回流的长度 L_r 约为常数。当口门宽改变时，回流的形状几乎不发生变化，即回流的长宽比 L_r/B_r 约为常数。但当盲肠与主流的交角 θ 变化时，长宽比却随之改变。岳建平曾通过模型试验得到如下经验关系式^[5]。

$$\frac{L_r}{B_r} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \bar{\theta}$$

由于恒定回流的旋转运动近乎是封闭的，回流前端在摩擦切力带动下向下壁，然后向盲肠内流动，回流末端必然有等量的补偿流向上壁然后向口门流动，从而达到一种动态平衡，即在紊动切力、压力及重力的综合作用下，使回流保持稳定的平面形态。

2.2 盲肠回流的形成

将各种盲肠形式概化成断面为矩形、平面上与主流正交的简单模式(如图 3 所示)。

当主流经过盲肠口门时，如果盲肠口门宽很大，而长度相对很小时，则主、副流截然分开的流动形态就不会出现，也不可能存在大尺度的充满盲肠口门的回流运动，而将代之以统一的明渠流运动。当盲肠口门有限，且长度足够大时，则必将出现主、副流分区流动的形态。

由于水流具有粘性，从而在固壁表面处形成减了速的边界层。假如靠近边界层的外流中存在使流动加速或者减速的压力差，则这些压力差也将影响到边界层内的流动。根据边界层分离理论^[6]，当压力在流动方向增加、出现逆压梯度时，主流就会与边界发生分离。当主流流经盲肠口门时，由于断面突然扩大，根据伯努利方程，流速突然减小，沿流动方向的压力必然迅速增大，出现逆压梯度。则如前所述，主流必然与盲肠边壁发生分离、迅速被推离盲肠边壁，直到主流被推

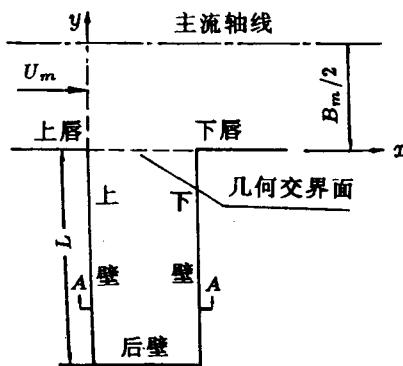


图3 概化模式示意图

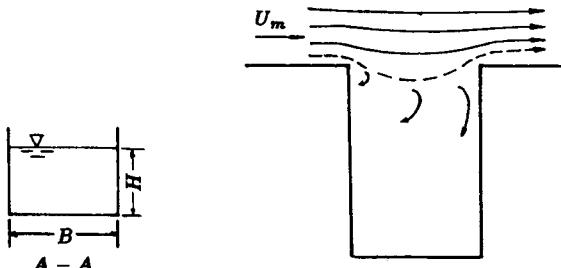


图4 主流与边界分离

移出盲肠口门，最终形成图4所示的流动形式。因此水流与边界的分离是引起盲肠系统流动分区的直接原因。

主流脱离边界，形成主、副流分区流动之后，由于在主、副流交界面处存在着较大的流速梯度，大小尺度的涡体产生强烈的横向掺混，主、副流亦将产生动量和水体交换。其动量交换正体现为主流通过紊动切力的形式不断地作用于副流。在持续恒定的紊动切应力 τ 的作用下，靠近交界面内侧的水体将随之运动、形成盲肠回流的摩擦流带。因此交界面附近涡体的横向掺混产生的紊动切应力是盲肠回流形成的动力源泉。

靠近口门附近的盲肠内水体在切应力作用下，随主流向前运动，继而沿下壁向盲肠内流动，必然使盲肠内侧水体的水位抬高，从而引起重力差，产生了正向压力差，使得盲肠内侧的水体开始向上壁，继而沿上壁向盲肠口门运动，形成盲肠回流的重力补偿流，从而维持回流得以持续恒定地运动。

由此可见，盲肠回流的运动是在水流的分离、交界处的紊动切应力和重力补偿三重作用下发生的。水流与边界的分离提供了回流运动的场所，紊动掺混产生的紊动切应力提供了回流运动的动力，重力补偿维持了回流运动的稳定。因而仅用紊动切应力解释回流运动的成因是不全面的。紊动切应力在紊动水流中处处皆有，但如果将水流的分离为回流运动提供空间场所，也就不足以形成回流。

2.3 盲肠回流系统的物理模式

盲肠口门内的回流，在恒定流情况下，是一种近乎封闭的竖轴环流运动，尽管主流通过紊动掺混区不断地对回流运动发生作用，但盲肠回流却具有相对独立性和自身的运动特点。口门附近的紊动掺混水流运动既有别于主流，又有别于回流，同样具有相对的独立性^[4]。因此，可以将盲肠口门水流运动系统划分为三个相对独立的流区：主流区、紊动掺混区、盲肠回流区（如图5所示）。这三个区的流动存在着很大的差别。明渠主流区可近似为有势流流动，盲肠回流则为有涡流，掺混区为二者的过渡区。

盲肠回流在平面上作曲线运动，在离心力和重力共同作用下维持平衡，通过水流的自动调节，使回流中心水面降低，周界水面升高，形成外高内低的径向比降，从而在回流区产生明显的径向环流。类似于弯道环流，水流在同一垂线上各相对水深处流向一般并不一致，表流斜向周界，底流斜向回流中心，使得回流中表层与底层的水流流线并不完全相同，且底流具有由底向上的螺旋状运动^[5]。所以盲肠回流是一种典型的三维流动。但为了抓住主要矛盾，对于浅水情况，我们可以将盲肠回流结构概化为平面上的竖轴回流，和以平面回流流线为轴的径向环流的叠加构成。当然这种叠加不是简单的线性叠加，而是非线性的复杂叠加。其二者的复杂叠加构成了回流运动

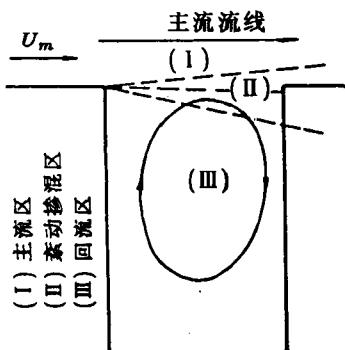


图 5 流动分区图

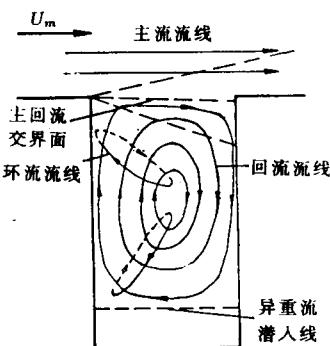


图 6 盲肠回流结构示意图

的三维结构。图 6 所示为二者的简单叠加结构。

3 回流场的流速分布特性

3.1 流速沿垂线分布

图 7 所示为回流场内总流速沿垂线分布的水槽模型试验结果^[4]。

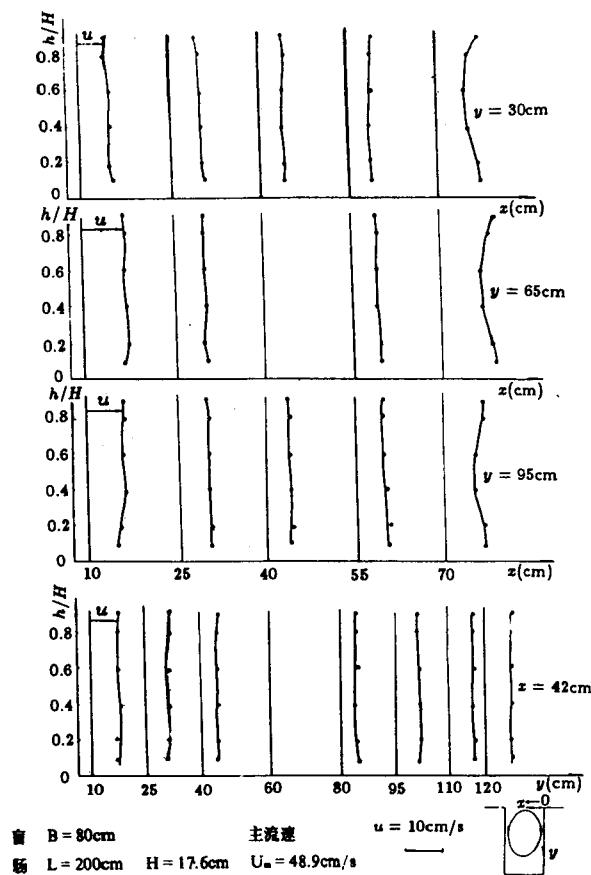


图 7 总流速沿垂线分布

根据 Prandtl 的混合掺长理论,一般无界固壁上的湍流运动,其流速沿垂线分布符合对数分布^[7],或者常采用的指数分布。而从作者的模型试验结果看,回流中,流速大小沿垂线分布要相

对均匀的多。改变主流流速和水深，结果亦然，即主流速的大小，只影响回流垂线平均流速的大小，对流速沿垂线的分布规律，并无大的影响。

回流中存在着径向环流，是引起流速分布特有规律的根本原因。罗索夫斯基曾导得一般明渠弯道中环流的横向流速分布公式^[6]。对糙率不大的河床，其简化形式为：

$$V_r = 6U \frac{H}{r} (2\eta - 1)$$

式中 U 为纵向垂线平均流速， V_r 为横向分流速； H, η 分别为水深和相对水深； r 为曲率半径；

这里仅引用它来进行定性说明。从该式可知，影响环流速度的因素，主要是水深 H 、相对水深 η 和曲率半径 r 。在回流中水流的三维性较强，底流与表流流向差别较大，底流的流线曲率半径要大大小于表流流线的曲率半径，因此底流的横向流速要大于表流的横向流速，由 $V = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2}$ (V_θ 为切向流速分量)，使得回流区底部水流的流速 V 必然偏大。因此回流内水流作曲线运动，且底流流线曲率半径小于表流流线曲率半径，使得底流径向流速影响显著，是引起合流速沿垂线分布较均匀的根本原因。

3.2 平面流速分布特性

作者曾在概化模型中，对回流区垂线平均流速在平面内的分布进行了观测，结果如图 8 所示。可以看出，流速由回流中心沿矢径向外逐渐增大；围绕回流中心的流线上各点的流速大小不等，沿下壁向里的水流流速一般略大于沿上壁向口门的水流流速。流速矢量一般在回流横轴上近似垂直于横轴，在其它各处一般不垂直于它至回流中心的径。整个回流场的流线与椭圆很相近，且越接近于中心，越趋近于圆。事实上，在不同的相对水深处的流线图大体相似，但各自的流向并不完全一致^[5]。

A. C. Обраовский、蔡树棠都曾得出，旋转液体的流速分布可表示为 $u = cr^m$ (式中 u 为垂线平均流速； r 为流速矢量至旋转中心的径)，且当为强迫旋涡时，有 $0 < m < 1$ 。即由旋转中心沿矢径，流速以指数律增大。回流属于强迫旋涡，但回流的平面形态并非是一个圆，流速矢量一般不垂直于它至回流中心的径，因而回流的流速分布并不能直接应用上式。在回流横轴上，流速矢量近似垂直于横轴，其流速分布近似符合指数律。作者曾经验地得到 $u = cr^{0.45}$ 。在其它各处，流速都难以满足指数分布，但仍表现为由中心沿径向向外流速逐渐增大的分布特性。

作者曾对回流的椭圆形流线进行概化^[5]，在图 9 所示坐标中，有流线方程：

$$x^2 + \frac{1}{[0.5(R/r_0) + 1]^2} y^2 = R^2 \quad (R = 0 \sim r_0)$$

式中 r_0 为回流横半轴长； R 为过横轴上点 $(R, 0)$ 的径。分析流速沿流线变化的特点见图 10。垂线平均流速沿流线近似于正弦曲线变化。可明显分为两个加速区 AB 段和 $A'B'$ 段；以及两个减速区 $B'A'$ 段和 $B'A$ 段。加减速区交替出现，每隔 $\frac{\pi}{2}$ 轮换一次。

回流流线近似为椭圆形，因而在下壁区顺水流方向，过水面积逐渐减小，流速随之增大；过

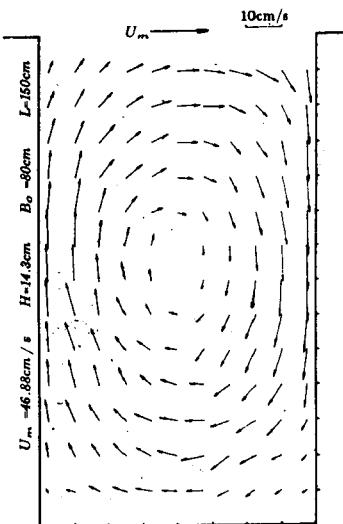


图 8 回流平面流速场

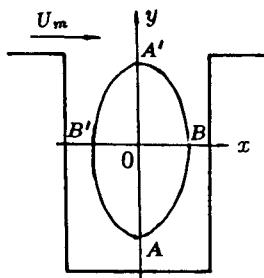


图 9 坐标示意图

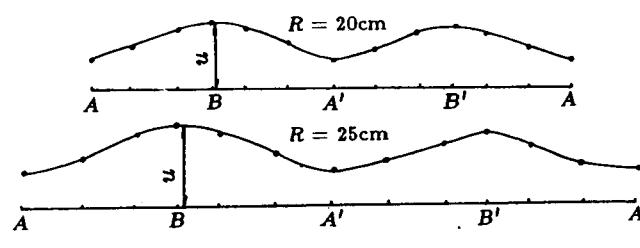


图 10 垂线平均流速沿流线变化

横轴后，顺水流方向过水面积逐渐增大，流速也随之减小。当水流在补偿流区过纵轴，在上壁区转向口门流动时，情况亦然。结果使整个回流区交替出现增、减速流区。

4 影响回流运动强度的因素

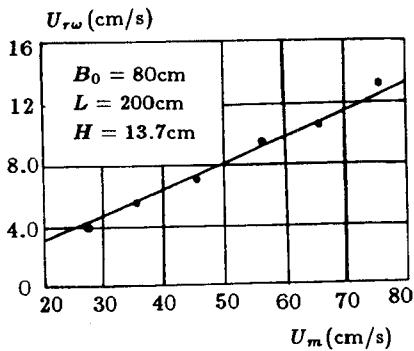
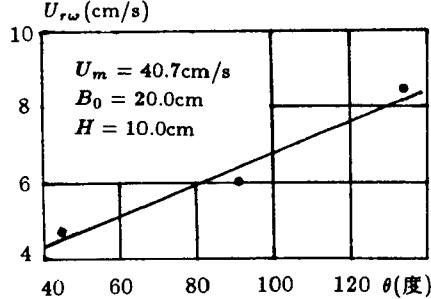
用回流横轴上的平均流速 $U_{r\omega}$ 来表达回流的运动强度。作者曾采用固定其它因素，仅仅变更某一因素的方法，试验研究了主流速 U_m 、水深 H 、盲肠口门宽 B_0 对回流强度的影响（见表 1、表 2、及图 11）。图 12 为岳建平考察盲肠与主流交角 θ 对回流强度影响的试验结果（引自文献[3]）。

表 1 $U_{r\omega} \sim H$ 关系表

H (cm)	10.3	13.7	17.3
$U_{r\omega}$ (cm/s)	9.12	9.15	9.22
盲肠 $B_0 = 80\text{cm}$ $L = 120\text{cm}$			
主流 $U_m = 56.45\text{cm/s}$			

表 2 $U_{r\omega} \sim B_0$ 关系表

B_0 (cm)	20	40	60	80
$U_{r\omega}$ (cm/s)	10.02	9.76	9.71	9.50
盲肠 $L = 200\text{cm}$ $H = 13.7\text{cm}$				
主流 $U_m = 60.05\text{cm/s}$				

图 11 $U_{r\omega} \sim U_m$ 关系图图 12 $U_{r\omega} \sim \theta$ 关系图

可见，回流强度随着主流速 U_m 和以及交角 θ 的增大而增大，但却与盲肠口门宽 B_0 及水深 H 基本无关。

回流强度随主流流速的增大而增大是显而易见的，因为主流速越大，主流作用于回流的紊动切应力也越大。随着盲肠与主流交角的增大，水流运动越平顺，口门内侧摩擦水流触下壁后向内运行的阻力和能量损失有所减小，所以回流强度随之增大。口门加大后，尽管总的切力有所增大，但回流的范围尺度也相应增大。水深加大后，交界面处水流的垂线平均流速变化不大，单位面积

上的切应力无甚变化，因而回流强度都基本不变。

5 回流的水面形态及径向环流

5.1 回流的水面形态

图 13 为作者在水槽模型上对回流表面水位的观测结果^[5]。

由回流中心向外，水位逐渐升高，从中心沿矢径形成外高内低的径向比降。我们知道回流中，水流围绕回流中心作旋转运动，必然产生方向背离回流中心的离心力，水流为了平衡这个力，通过调整水位，使得由中心向外的水位逐渐增高，产生由外向中心的重力差，水面也因此产生径向比降。

取两条流线，分析回流中沿流线各点的水位变化，如图 14 所示。

结果表明，水位沿流线不断变化，同图 10 的流速变化相比较，同样出现两个水位升高区 BA' 段和 $B'A'$ 段，以及两个水位降低区 $\hat{A}B$ 段和 $A'B'$ 段。水位升高区和降低区交替出现，每隔 $\frac{\pi}{2}$ 轮换一次。但应注意的是，水位升高区正好对应的是

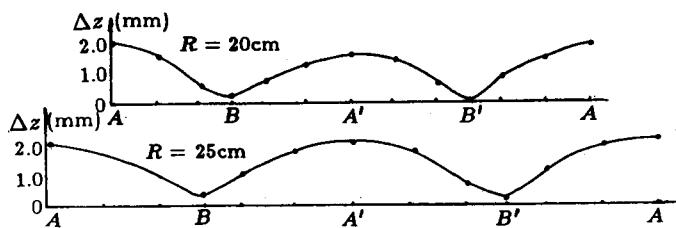


图 14 沿流线水位变化图

流速减小区，水位降低区对应的是流速增大区。这正反映了回流中，动能与势能的相互转化过程：当流速减小时，动能转化为势能，导致水位抬升；反过来，当水位降低时，势能转化为动能，导致流速相应增大。

5.2 回流内的径向环流

类似于弯道水流情况，来分析回流内的径向环流的成因及特点。

假设回流内水流的切向流速 V_θ 沿垂线分布近似符合指数律（图 15a），取 $dr \cdot rd\theta \cdot H$ 的水柱进行分析。忽略底部阻力，在水平方向上，水柱受到压力（水面高差引起的重力差）和离心力的作用，其垂向分布如图 15b 示。两个力的合力沿垂向分布如图 15c 所示。结果必然导致表层水流流向回流周界，底层水流流向回流中心，如图 15d 示。同时，由于水流运动的连续性，回流中心水流出现由底向上的上升运动，而在回流周界出现由上至下的下潜运动，从而形成径向环流。一般讲，边壁切力分布的不均匀性，同样可以引起环流运动，但就盲肠回流来讲，较强的径向环流主要是由于水流作曲线运动而引起的。

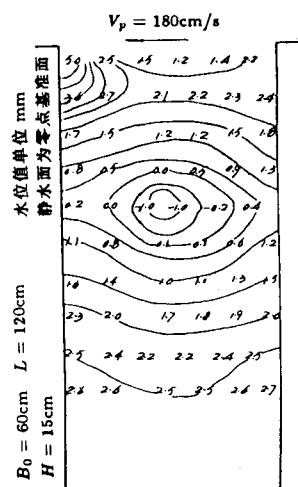


图 13 回流表面水位等值线

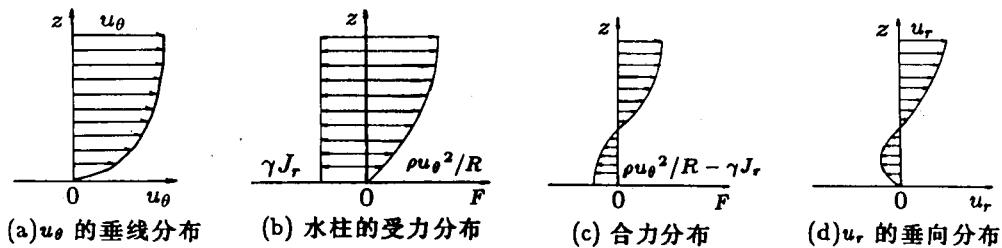


图 15 径向环流形成分析示意图

回流中的径向环流具有如下特点：

- (1) 径向环流是不封闭的，随着水流的曲线运动，呈螺旋线运动状态。
- (2) 回流内沿流程，径向环流强度很不均匀，周期性地衰减和增强，是一种非均匀环流。

6 回流的平面流速场分析

6.1 回流场的数学描述

从上述的分析知，盲肠回流是一种复杂的三维流动，难以作为平面问题进行处理。只有在水深相对较小的浅水情况下，才可以将其沿水深平均，近似作为平面二维问题来考虑。下面就浅水情况对回流的平面流速场进行简单分析。

大尺度的旋涡运动一般可分为自由旋涡和强迫旋涡两种类型，盲肠回流是在外界主流切力的持续作用下形成和维持运动的，属于强迫旋涡。对于强迫旋涡有^[9]：

$$u = cr^m \quad (0 < m < 1) \quad (1)$$

可计算得流体质点的转动角速度：

$$\omega_z = \frac{1}{2} m c r^{m-1} \neq 0$$

所以强迫旋涡是有旋运动。

盲肠回流的流线并非圆形，式(1)并不能准确代表盲肠回流的流速分布。但可以从这种典型代表形式中得出结论：盲肠回流不是势流运动，而是有涡运动，亦即质点的流函数 ψ 并不满足拉普拉斯方程，而是取更一般的普阿松形式：

$$\Delta\psi = -\Omega_z \quad (2)$$

式中 $\Omega_z = 2\omega_z$ ，代表质点的旋度。

取图 16 所示的坐标系，则方程(2)的边界条件为：在盲肠固壁上和在主、回流交界面上流函数为零。近似取口门处零流线与口门几何交界面重合，则有边界条件：

$$\text{当 } x = 0, B_0 \text{ 时, } \psi = 0 \quad (3)$$

$$\text{当 } y = 0, L \text{ 时, } \psi = 0 \quad (4)$$

方程(2)及(3)、(4)即为对盲肠回流平面流场的简单数学描述。

6.2 平面流速场的近似求解

一般来讲，回流场中各处的涡量 Ω_z 是不等

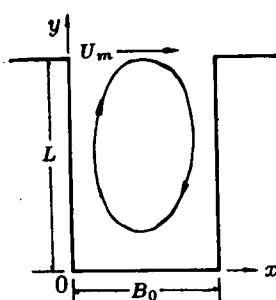


图 16 坐标示意图

的，即 Ω_z 是非均匀分布的。但是在一些部位的差别是很小的，或者说可近似看作均匀分布。例如回流中心附近，或者当回流流速较小，沿径向变化均匀时，作为一种粗略近似，将回流场中的 Ω_z 作为常数处理，则可极大地简化回流运动方程的求解。此时方程(2)就变成经典的泊松方程，可用分离变量法求解：

$$\text{令 } \psi = \psi_o - \Omega_z \left[\frac{1}{2} \left(y - \frac{L}{2} \right)^2 - \frac{L^2}{8} \right] \quad (5)$$

代入方程(2)及边界条件(3)、(4)中，得到 ψ_o 满足的方程：

$$\begin{cases} \Delta \psi_o = 0 \\ x = 0, B_o \text{ 时}, \psi_o = \frac{1}{2} \Omega_z \left[\left(y - \frac{L}{2} \right)^2 - \frac{L^2}{4} \right] \\ y = 0, L \text{ 时}, \psi_o = 0 \end{cases} \quad (6)$$

方程(6)恰好是拉普拉斯方程。

$$\text{令 } \psi_o(x, y) = X(x) \cdot Y(y) \quad (7)$$

代入(6)式，并由 X, Y 的独立性得到：

$$X'' - \lambda X = 0 \quad (8)$$

$$Y'' + \lambda Y = 0 \quad (9)$$

$$Y(0) = Y(L) = 0 \quad (10)$$

$$\psi_o(o, y) = \psi_o(B_o, y) = \frac{1}{2} \Omega_z \left[\left(y - \frac{L}{2} \right)^2 - \frac{L^2}{4} \right] \quad (11)$$

由此我们可以解得：

$$Y(y) = C \sin \frac{k\pi}{L} y \quad (12)$$

$$X(x) = A_k e^{\frac{k\pi}{L} x} + B_k e^{-\frac{k\pi}{L} x} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

于是由方程(6)的线性性得：

$$\psi_o = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k e^{\frac{k\pi}{L} x} + B_k e^{-\frac{k\pi}{L} x}) \sin \frac{k\pi}{L} y \quad (14)$$

$C, A'_k, B'_k, A_k, B_k (k = 1, 2, \dots)$ 均为待定系数。

将(14)式代入边界条件(11)式中，根据 Fourier 展开式的唯一性，最后得到：

$$A_k = - \frac{2\Omega_z}{L} \left(\frac{1}{k\pi} \right) \frac{1 - e^{-\frac{k\pi}{L} B_o}}{\operatorname{sh} \frac{k\pi}{L} B_o} \quad (15)$$

$$B_k = - \frac{2\Omega_z}{L} \left(\frac{L}{k\pi} \right)^3 \frac{1 - e^{\frac{k\pi}{L} B_o}}{\operatorname{sh} \frac{k\pi}{L} B_o} \quad (16)$$

代入(14)式，并化简得：

$$\psi_o = - 4\Omega_z \sum_{m=1}^{\infty} \frac{L^2}{(2m-1)^3 \pi^3} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \cdot \sin \frac{\pi}{L} (2m-1)y \quad (17)$$

将上式代入式(5)中，得到(2)、(3)、(4)的解：

$$\psi = - \Omega_z \left[\frac{1}{2} \left(y - \frac{L}{2} \right)^2 - \frac{L^2}{8} \right]$$

$$+ 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{L^2}{(2m-1)^3 \pi^3} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \cdot \sin \frac{\pi}{L} (2m-1)y] \quad (18)$$

(m = 1, 2,)

实际盲肠河段，通常 L 很大，除出现一级回流外，还可能出现二级、三级回流。我们在求解方程时，实际上是忽略了这种情况，即假定 L 不太长，盲肠内只出现一个大旋涡。对于实际情况，可假定 L 为一级回流的长度，方程的解仍可视作此时的一级回流的近似解。

6.3 数值模拟

式(18)是回流场的一种近似解，但我们仍可以从中分析了解回流场流速分布的基本特性。

由式(18)可求得回流的流速分布：

$$u = -\Omega_z [y - \frac{L}{2} + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{L}{(2m-1)^2 \pi^2} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \cdot \cos \frac{\pi}{L} (2m-1)y] \quad (19)$$

$$v = \Omega_z [4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{L}{(2m-1)^2 \pi^2} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \cdot \sin \frac{\pi}{L} (2m-1)y] \quad (20)$$

由于：

$$\left| \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \right| \leq 1, \quad \left| \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{L} (2m-1)(x - \frac{B_o}{2})}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{L} (m-1) B_o} \right| \leq 1$$

$$\left| \sin \frac{\pi}{L} (2m-1)y \right| \leq 1, \quad \left| \cos \frac{\pi}{L} (2m-1)y \right| \leq 1$$

可以证明(18)~(20)三式中的无穷级数均收敛。

由 u, v 可求得水流的合速度：

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (21)$$

流速偏向角：

$$\theta = \operatorname{arctg}(\frac{v}{u}) \quad (22)$$

在盲肠回流区，根据物理模式分析可知，涡量 Ω_z 为负值，对口门宽 $B_o = 80\text{cm}$ 、回流长 $L = 130\text{cm}$ 的正交盲肠回流，根据试验资料，近似取 $\Omega_z = -0.35$ 时，对盲肠回流的流函数分布和流速场进行数值计算，模拟结果见图 17、图 18。

可见，盲肠回流的流线近似椭圆形，且沿流线可明显发现加减区和减速区的周期性变化趋势及流速沿径向逐渐增大的变化规律，与实际情况是相符合的。与模型试验结果比较(图 17 中，实线为计算值，虚线为试验值)，基本符合良好，尤其在靠近回流中心附近。进一步验证了回流场流速分布的基本特性。也说明式(18)~(20)尽管是一种简化情况下的近似解，但也可以较好地描述回流的平面流场结构。

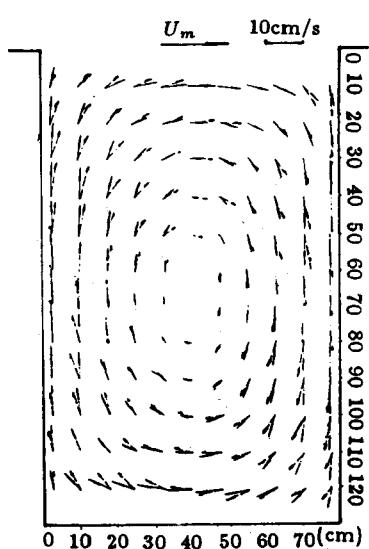


图 17 流速分布图

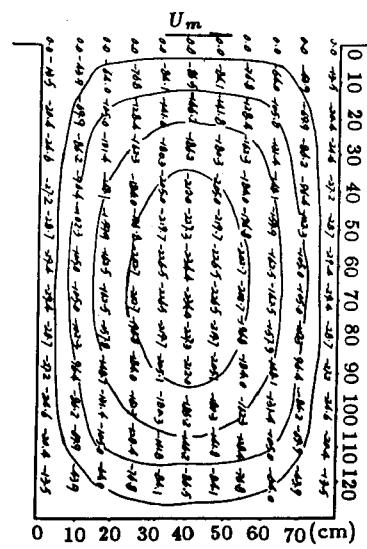


图 18 流函数分布图

7 结语

本文较为系统地介绍了作者近年来对盲肠回流水流运动的研究成果和认识。以水槽模型试验现象和资料为依据, 主要用定性分析和阐明机理的方法, 较全面细致地论述了盲肠回流的水流运动特性, 为进一步探讨盲肠回流的泥沙运动和淤积规律打下了坚实基础, 具有一定的理论和实际意义。应指出的是, 盲肠回流内的径向环流结构十分复杂, 但对回流运动又十分重要。而我们对这一点研究和认识的水平还很不够, 有待于更深入细致的理论分析和试验研究。

致谢: 本文得到了武汉水利电力大学谢鉴衡教授、魏良琰教授的悉心指导。

参 考 文 献

- 1 谢鉴衡. 葛洲坝枢纽引航道水流泥沙问题及其解决途径. 武汉水利电力学院, 1982, 10.
- 2 范家骅. 京杭运河穿黄试验报告. 北京水利水电科学院河渠所, 1960, 5.
- 3 岳建平. 港渠口门回流淤积概化模型试验和研究. 泥沙研究, 1986, (2).
- 4 刘青泉. 盲肠河段回流区及主、回流过渡区的水沙运动. 武汉水利电力大学博士论文, 1993, 4.
- 5 刘青泉. 回流水沙运动规律的试验研究. 武汉水利电力学院硕士论文, 1990, 6.
- 6 И. Л. Розенфельд. 弯道上的横向环流及其与水面形状的关系、弯道上的纵向流速分布. 河床演变(论文集), 科学出版社, 1965, 6.
- 7 Prandtl L. et, at. 流体力学概论. 郭永怀, 陆士嘉译, 科学出版社, 1981, 5.
- 8 Schlichting H. Boundary Layer Theory. McGRAW-HILL, 1979.
- 9 蔡树棠, 麻伯坤. 涡量脉动相似结构和圆形旋涡流速分布. 中国科学技术大学, 1979, 9.

The Characteristics of Water Movement in Cecum Circulating Flow

Liu Qing-quan

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract In this paper, based on the results of recent research, a systematical study on the formation of cecum circulating flow and the fundamental mechanism of water movement is made, the physical model of cecum circulating flow is given also. According to the experimental data and phenomena, the property of velocity distribution, the form of water surface, and the main factors which influence the motion intensity of circulating flow are analysed. A approximate formula for calculating the plane distribution of velocity is obtained.

Key words cecum reach, circulating flow, water movement