

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.02.011

# 充水阶段无压输水洞岔洞段水力特性

王克忠<sup>1</sup>, 邓浩浩<sup>1</sup>, 李兆崔<sup>2</sup>, 王学成<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310023;  
2. 日照市供水工程管理处, 山东 日照 276800; 3. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013)

**摘要:**长距离无压引水洞岔洞是影响水流流态和分流量的关键水工建筑物之一, 充水阶段流态复杂。通过Fluent软件对不同入口流量、岔洞夹角下的无压卜型岔洞充水阶段进行了数值仿真研究, 并通过模型试验对不同入口流量下水流平稳后的岔洞段各监测断面水深及支洞分流比进行了验证。结果显示, 充水阶段支洞分流比对入口流量敏感性小, 岔洞夹角在 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内变化时, 分流比变化较大。另外, 岔洞夹角增至 $60^{\circ}$ 时, 侧支洞外侧上部水流出现回流区。岔洞夹角对总干水面线影响较小, 岔洞段各断面水位随入口流量增加而升高。

**关键词:**充水阶段; 岔洞夹角; 分流比; 水面线; 回流区

**中图分类号:** TV672.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2019)02-0264-09

中国幅员辽阔, 水资源空间分布不平衡, 为缓解地区缺水问题, 输水隧洞发挥着重要作用。岔洞作为分流建筑物普遍存在于水工隧洞中, 其岔角、边界条件等对分流比、岔洞段沿程水面线等有重要影响, 但岔角、边界条件等对充水阶段岔洞段水流特性研究较少。

Luo等<sup>[1]</sup>采用试验与数值计算方法研究了上游渠道与侧支渠汇流时的水流特性, 得到了不同汇流比时交岔处水流压强、流速分布。茅泽育等<sup>[2]</sup>、杨青远等<sup>[3]</sup>对明渠交汇口水流分离区及交汇水流阻力进行了研究。Bazin等<sup>[4]</sup>研究发现明渠交叉口处障碍物对水流流态的影响取决于障碍物在交叉口的的位置。陈启刚等<sup>[5]</sup>采用高频粒子图像测速系统PIV对明渠弯道横向与纵向水流流速进行了研究, 成功重构了弯道水流的三维平均流速场。郭维东等<sup>[6]</sup>研究了分流比及取水角度对弯道引水口流场的影响。陆彦等<sup>[7]</sup>利用PIV图像采集系统及数据分析软件, 测量了明渠水流流速并分析了不同渗流强度对明渠水流结构的影响。吴永妍等<sup>[8-9]</sup>研究了明渠收缩角度与不同长度过渡段对水流紊动强度分布的影响, 结果表明水面收缩角过大, 会导致水流紊动加剧, 能量损失增加, 过流能力降低。文献[10-11]研究发现水面区域对明渠湍流作用较为明显, 但目前明渠水面区域对湍流瞬态运动的作用理论还不充分<sup>[12]</sup>。文献[13-15]研究了明渠中植被对沿程水位、紊流特性、流态等的影响。输水阶段岔洞段水流为明渠流, 上述研究可应用于输水阶段; 充水阶段水流呈现瞬变流特性, 流态复杂, 但国内外学者对无压隧洞研究集中于泄洪洞的水流特性研究, 对无压隧洞充水阶段研究较少<sup>[16]</sup>。杨开林等<sup>[17]</sup>采用隐式法中四点差分格式求解一维非恒定流基本方程, 模拟了万家寨引黄入晋跨流域无压洞的充水过渡过程。王克忠等<sup>[18]</sup>对无压卜型岔洞进行了体型优化设计, 并通过闸门调度组合探寻充水过程中支洞合理分流比。王晓玲等<sup>[16]</sup>利用VOF法及三维标准紊流数学模型描述无压引水洞水气两相流流动过程, 对CFD(Computational Fluid Dynamics)应用于无压隧洞水气两相流的可行性进行了验证。于跃等<sup>[19]</sup>对长距离无压引水洞水气两相流进行了模拟, 并通过模型试验数据对模拟结果进行了验证分析。

国内外学者对无压隧洞充水阶段研究较少, 而岔洞作为水工隧洞重要的组成部分, 其易出现回流区冲刷等不利的水力现象, 因此, 岔洞段充水阶段水流特性具有重要研究意义。本文选取VOF法、标准 $k-\varepsilon$ 湍流方

收稿日期: 2018-08-07; 网络出版日期: 2019-02-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20190222.0858.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679215)

作者简介: 王克忠(1965—), 男, 山东冠县人, 教授, 博士, 主要从事水利工程理论研究。E-mail: wkz@zjut.edu.cn

通信作者: 邓浩浩, E-mail: denghaohao@zjut.edu.cn

程模型对岔洞段充水过程进行了数值仿真分析, 并选取充水后  $t = 360$  s 时刻水流流场图、沿程水面线及支洞分流比等数值计算结果进行分析研究, 该时刻水流平稳, 岔洞段流场随时间变化较小。不同入口流量下, 岔角  $53^\circ$  的岔洞段充水过程  $t = 360$  s 时刻监测断面水深及支洞分流比通过水工模型试验进行验证。

## 1 基本控制方程

$$\text{连续性方程}^{[20]}: \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程:} \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + S_i \quad (2)$$

$$\text{湍动能 } k \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{湍动能耗散率 } \varepsilon \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中:  $u_i$  为时均速度, m/s;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  为分子扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\mu_t$  为湍动扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $p$  为时均压强, Pa;  $k$  为紊流动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为紊流动能耗散,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  为  $k$ 、 $\varepsilon$  方程的紊流 Prandtl 数, 分别取 1.0、1.3;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为经验常数, 分别取 1.44、1.92; 本文采用 PISO (Pressure Implicit Split Operator) 算法求解。

水流自由面通过 VOF 方法追踪。定义  $F$  为单元体内水气体积比函数,  $F = 1$  表示单元体内充满水,  $F = 0$  时, 单元体内没有水,  $0 < F < 1$  表示单元体内含有自由液面。函数  $F$  由水气两相的体积分数连续方程确定:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

## 2 仿真计算

本文以山西省中部引黄工程为研究对象, 选取输水洞总干、东干、西干交叉口岔洞段对充水阶段水流特性进行了数值分析研究, 模拟长度分别取 60 m、80 m、80 m, 坡度  $i$  分别为 1/3 000、1/2 000、1/3 000, 横断面形式均为城门洞型, 宽度分别为 3.6 m、3.0 m、2.5 m, 侧墙高度分别为 3.2 m、2.8 m、2.2 m, 顶拱圆弧角度分别为  $180^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $135^\circ$ 。充水阶段各断面水深较小, 均未超过直墙高度, 建模时岔洞模型拱顶简化为平顶, 直墙高度均取 4 m。岔角分别取  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $53^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $65^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $75^\circ$ , 数值计算中, 总干入口流量分别取  $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $25.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。实际工程岔角为  $53^\circ$ , 总干设计流量为  $16.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , 设计水深为 3.17 m, 岔洞平面见图 1。

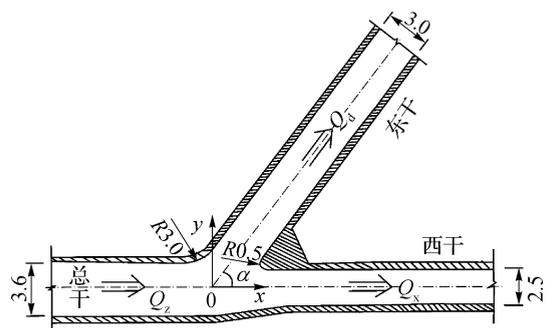


图1 岔洞平面(单位: m)

Fig. 1 Plane of branch tunnel

如图 1 所示, 东干隧洞为侧支洞, 西干隧洞为下游支洞, 总干入口流量与东、西干出口流量分别以  $Q_1$ 、

$Q_d$ 、 $Q_x$ 表示。总干、西干隧洞纵向轴线重合,东、西干隧洞轴线夹角记作 $\alpha$ ,隧洞底板顶面,三洞轴线交点O为坐标原点,总干、西干隧洞水流向为 $x$ 轴正向,竖直向上为 $z$ 轴正向。岔角 $\alpha$ 改变时,保持岔洞体型不变,以减小其对岔洞段水流流态的影响,即东干与总干直墙均通过半径3 m的弧段侧墙连接,东、西干隧洞直墙通过半径0.5 m的弧段侧墙连接,总干与西干收缩段侧墙通过折线段直墙连接,直墙长度在 $x$ 方向投影长度为5 m。

## 2.1 边界条件

总干入口边界分为液相和气相入口边界,液相入口采用速度边界,边界条件为: $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0, \mathbf{v} = 0, \mathbf{w} = 0$ 。其中, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别为液相在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向速度分量, $u_0$ 为数值计算中设定的水流沿 $x$ 轴方向的速度。总干气相入口采用压力边界,东干、西干出口均采用压力边界,压力大小均为大气压,边界条件为: $p = 1.01 \times 10^5$  Pa,壁面为无滑移壁面,糙率 $n = 0.014$ 。

## 2.2 网格划分

数值计算采用壁面函数法,为保证模型网格质量,岔洞模型以六面体网格进行划分,单元总数271 790个。网格划分:隧洞横断面网格相邻节点间距为0.2 m,东、西干交岔处局部网格加密,沿洞轴线方向,相邻节点间距0.1 m。总干、东干、西干隧洞轴线方向网格相邻节点间距为0.4 m。

# 3 水工模型试验

## 3.1 模型制作与试验过程

水工模型选用正态模型,采用重力相似准则,几何相似比尺1:15。按相似原理以比例15:1缩小并制作岔洞段试验模型,模型材料选取有机玻璃,糙率 $n = 0.008 4$ 。流速、流量等参数相似比按几何相似比计算得到,各参数相似比尺见表1。

表 1 参数比尺  
Table 1 Ratio scale of parameter

参数	几何	流速	流量	时间	重度	粗糙
比尺	15.00	3.87	871.40	3.87	1.00	1.57

模型试验中,总干、东干、西干隧洞模型长度分别为9 m、8 m、15 m,换算成原型隧洞长度分别为135 m、120 m、225 m。坡度 $i$ 分别为1/3 000、1/2 000、1/3 000。

## 3.2 边界条件及监测

模型试验时,总干入口连接储水池,试验过程稳定水池水位,入口流量通过总干入口处闸门开度进行调节,模型与其对应原型中,总干入口水深与流量对应关系见表2。

表 2 总干入口水深与入口流量关系  
Table 2 Relation between main tunnel inlet flow and inlet water depth

总干入口水深/m		总干入口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	
模型	原型	模型/( $\times 10^{-3}$ )	原型
0.06	0.90	15.8	13.8
0.09	1.35	22.5	19.6
0.12	1.80	28.8	25.1
0.15	2.25	34.9	30.4
0.18	2.70	40.8	35.6

试验中东、西干模型隧洞流入水池内的水被及时排出, 保证出水池内的水始终低于东、西干模型隧洞底板, 不影响充水阶段东、西干隧洞模型末端水流流态。流速测量设备采用 LGY-II 型便携式流速测算仪, 测速范围为  $0.01 \sim 4.00 \text{ m/s}$ , 测流误差小于  $1.5\%$ ; 水位测量采用水位计、刻度尺, 水位计型号 DPSH-A, 测量范围为  $0 \sim 100 \text{ m}$ , 精度为  $1 \text{ mm}$ 。水位监测断面与点  $O$  的距离见表 3。

表 3 各监测断面与  $O$  点距离

m

Table 3 Distance between monitoring section and point  $O$ 

	总干		西干			东干	
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
模型	3	1	1	3	5	1	3
原型	45	15	15	45	60	15	45

## 4 数值计算结果与模型试验验证

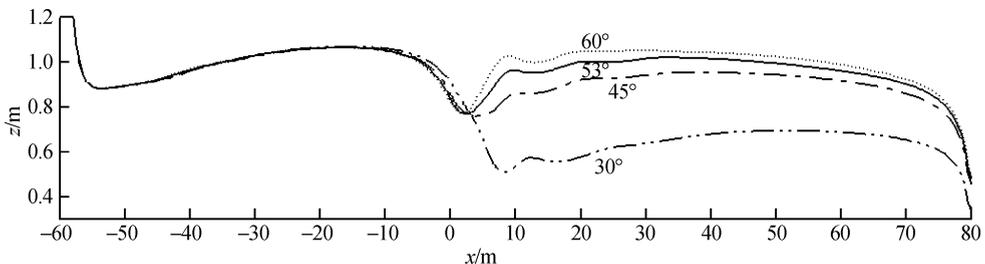
采用 Fluent 软件对不同岔角岔洞段充水阶段进行了数值计算, 给出了岔洞段水面线、流场及支洞分流比, 同时给出了不同入口流量下岔角  $53^\circ$  岔洞段充水阶段的水流流动特性, 并通过物理模型试验对不同入口流量下岔洞段各监测断面水深及支洞分流比进行了验证。数值计算采用瞬态计算, 计算至  $t = 360 \text{ s}$  时, 进、出水流量相同, 岔洞段水位、流场等受时间影响较小, 文中水面线、分流量、流速分布等数值计算结果均为  $t = 360 \text{ s}$  时刻的数据。

### 4.1 岔角对岔洞段水面线影响

无压岔洞段充水阶段沿程水位的影响因素较多, 包括岔洞夹角  $\alpha$ 、入口流量  $Q_2$  等。数值计算中根据总干入口水位确定其对应水体积分数, 并以此水体积分数作为水面线判定依据。

不同  $\alpha$  下, 总干水面线均呈现先下降随后上升, 而后趋于平稳, 最后下降的趋势。第一下降段位于总干入口段 ( $-60 \text{ m} \leq x < -55 \text{ m}$ ), 入口处水流位置水头转换为流速水头, 水位下降; 第二段为水位平稳上升段 ( $-55 \text{ m} \leq x < -35 \text{ m}$ ), 由于壁面阻力作用, 流速水头转换为位置水头, 水位升高; 第三段为水位过渡段 ( $-35 \text{ m} \leq x < -10 \text{ m}$ ), 水流平稳, 水位在  $1.04 \text{ m}$  上下小幅波动; 第四段为下降段 ( $-10 \text{ m} \leq x < 0 \text{ m}$ ), 位于分岔口上游, 受分岔口分流影响较大, 水位下降, 同一断面下,  $\alpha = 30^\circ$  时, 水位最高,  $\alpha = 45^\circ \sim 60^\circ$  时, 水位基本相同。

西干隧洞段自  $x = 0 \text{ m}$  断面起, 止于  $x = 80 \text{ m}$  断面。隧洞分岔口位于西干隧洞前段 ( $0 \text{ m} \leq x < 10 \text{ m}$ ) 中, 该段水位呈现先下降后升高的趋势, 水位下降段长度随  $\alpha$  增加而减小, 当  $\alpha = 30^\circ$  时, 西干隧洞下降段长度为  $9 \text{ m}$ , 此时,  $x = 9 \text{ m}$  断面水位为  $0.50 \text{ m}$ 。西干隧洞中段 ( $10 \text{ m} \leq x < 70 \text{ m}$ ), 水流平稳, 各断面水深随  $\alpha$  增加而增加, 分别在  $0.68 \text{ m}$ 、 $0.92 \text{ m}$ 、 $1.00 \text{ m}$ 、 $1.04 \text{ m}$  上下小幅波动。西干末段 ( $70 \text{ m} \leq x < 80 \text{ m}$ ), 出口边界水流自由出流, 该段沿程水位急剧下降, 受边界影响的水流长度为  $10 \text{ m}$ 。总干、西干水面线见图 2。

图 2 不同  $\alpha$  下的总干、西干沿程水面线Fig. 2 Waterline of main tunnel and west branch tunnel with different  $\alpha$

### 4.2 $\alpha$ 对分流比的影响

通过数值计算得到不同岔角  $\alpha$  下，东、西干隧洞分流比见表 4。

表 4 不同岔角下的分流比

Table 4 Discharge ratio under different diversion angle

分流比	15°	30°	45°	53°	60°	65°	70°	75°
$Q_d/Q_z$	0.564	0.503	0.423	0.407	0.399	0.397	0.396	0.394
$Q_x/Q_z$	0.436	0.497	0.576	0.593	0.601	0.603	0.604	0.606

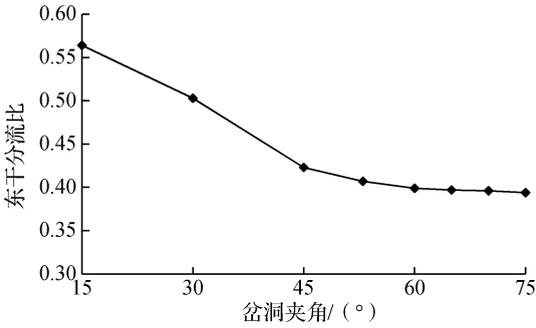


图 3 分流比和岔洞夹角关系

Fig. 3 Discharge ratio curve under different diversion angle

由表 4 可知， $\alpha$  在 15° ~ 45° 范围增大时，东干分流比由 0.564 减小为 0.423，西干分流比由 0.436 增加为 0.576，东干分流比下降了 25%，即  $\alpha$  从 15° 增至 45°，东干分流量减少了 25.0%，其中，岔角 30° 时，东干分流比为 0.503，西干分流比为 0.497，东西干分流量基本相同，岔角继续增加，西干分流量大于东干。 $\alpha$  在 45° ~ 75° 范围增加，东干分流比由 0.423 减小为 0.394，西干分流比由 0.576 增加为 0.606，东干分流比下降 6.8%，其中， $\alpha$  由 45° 增至 60°，东干分流比由 0.423 减为 0.399，下降 5.7%， $\alpha$  由 60° 增至 75°，东干分流比由 0.399 减为 0.394，下降 1.2%。东干隧洞分流比随岔洞夹角关系曲线见图 3。

由图 3 可知，对东干分流比影响较大的夹角范围为 15° ~ 45°，岔角在 45° ~ 60° 范围变化时，东干分流比受岔洞夹角影响减小，岔角在 60° ~ 75° 范围内增加，东干分流比随岔角变化曲线较平缓，岔角对东干分流比基本无影响。

### 4.3 $\alpha$ 对岔洞段流场的影响

文中只给出了岔角为 45°、53°、60° 时，岔洞段  $z = 0.2\text{ m}$ 、 $0.4\text{ m}$  平面的流场，分别如图 4、图 5 所示。由图 4 可知， $z = 0.2\text{ m}$  平面，最大流速所在区域出现在东干入口处中部，随岔角增加，流速值分别为 6 m/s、5.5 m/s、5.5 m/s，最小流速区集中于岔洞档部及东干入口段外侧，流速值均在 3 m/s 以下。 $z = 0.2\text{ m}$  平面，岔洞段水流平顺，岔角增加，最大流速区面积逐渐减小，最小流速区面积逐渐增加。

隧洞交叉处水流流速为 4.5 m/s，同一岔角下， $z = 0.4\text{ m}$  较  $z = 0.2\text{ m}$  平面，岔洞段 4.5 m/s 流速值所在区域更大。同一平面处，该流速值所在区域随  $\alpha$  增加而逐渐减小。 $z = 0.4\text{ m}$  平面， $\alpha$  由 45° 增至 53°，东干外侧流线顺直。 $\alpha$  增至 60°，东干分流量减小，水位下降，东干入口段外侧有回流区。

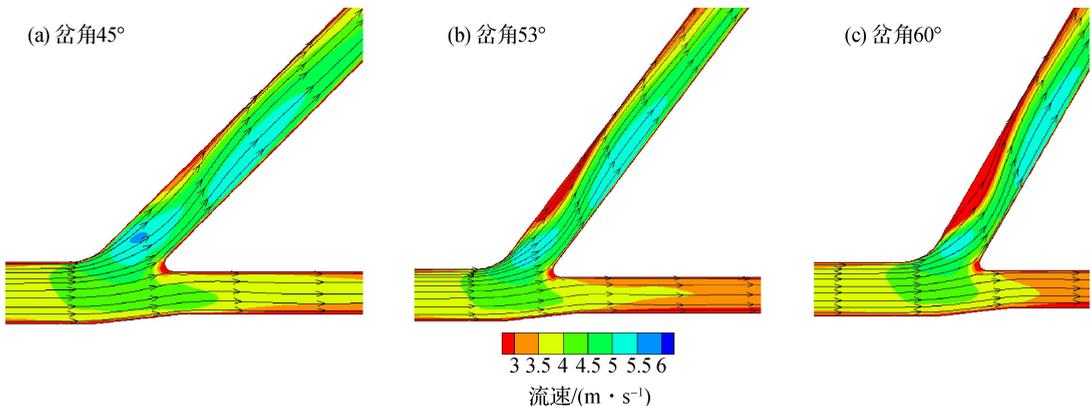


图 4  $z = 0.2\text{ m}$  平面岔洞段流场

Fig. 4 Flow field of branch tunnel on the plane of  $z = 0.2\text{ m}$

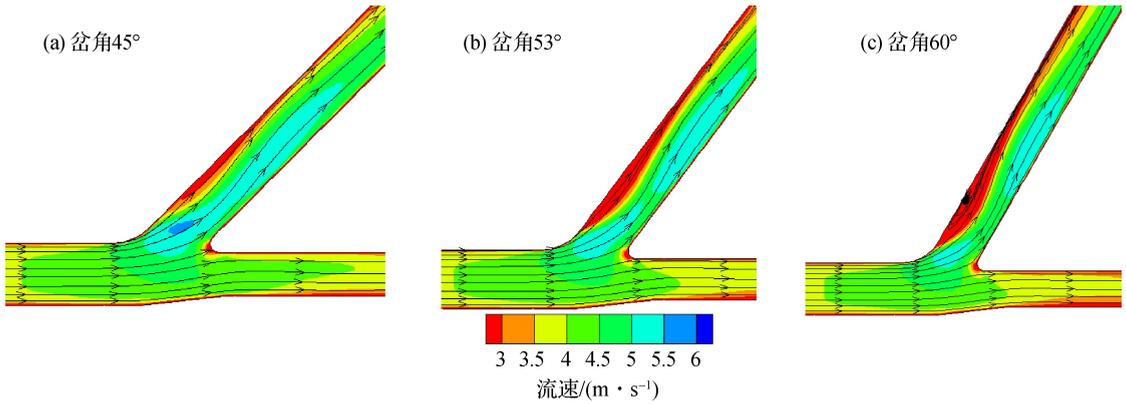


图 5  $z = 0.4 \text{ m}$  平面岔洞段流场

Fig. 5 Flow field of branch tunnel on the plane of  $z = 0.4 \text{ m}$

#### 4.4 数值结果与模型试验对比

通过模型试验对不同入口流量工况进行验证, 岔洞段各监测断面位置见表 3, 通过数值计算与模型试验得到的各监测断面水深数据见表 5。

表 5 隧洞特征断面水深

m

Table 5 Water depth of characteristic section in tunnel

流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	总干		西干					东干						
	1#		2#		1#		2#		3#		1#		2#	
	数值	试验												
13.8	1.16	1.18	1.15	1.16	0.95	1.10	0.94	1.06	0.74	0.85	0.26	0.28	0.37	0.38
19.6	1.53	1.60	1.52	1.54	1.33	1.40	1.32	1.34	1.12	1.14	0.28	0.31	0.43	0.44
25.1	1.91	2.00	1.71	1.78	1.61	1.66	1.50	1.54	1.31	1.36	0.34	0.37	0.43	0.47

由表 5 可知, 通过数值计算结果与模型试验数据得到特征断面水深吻合较好。充水阶段, 掺气量大, 水气界面不明显以及测量存在一定误差, 导致试验水深比数值计算结果偏大。

以总干 1#断面为例, 当入口流量为  $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 通过数值计算、模型试验得到的断面水深分别为  $1.16 \text{ m}$ 、 $1.18 \text{ m}$ , 两者相差  $0.02 \text{ m}$ , 误差为  $1.7\%$ 。入口流量为  $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 西干 3 个监测断面(3#、4#、5#)误差均在  $10\% \sim 20\%$  之间, 3#断面距分水中心距离最近, 误差最大, 为  $15.8\%$ 。入口流量为  $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $25.1 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 两种方法测得各断面水深误差在合理范围内。由于人为因素及仪器设备精度、敏感度等原因, 两种研究方法得到相应断面水深不同, 数值计算与模型试验结果中, 隧洞各监测断面水深误差见表 6。

表 6 隧洞监测断面水深误差

%

Table 6 Water depth error of the tunnel monitoring section

入口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	总干		西干			东干	
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
13.8	1.7	0.9	15.8	12.8	14.9	7.7	2.7
19.6	4.6	1.3	5.3	1.5	1.8	10.7	2.3
25.1	4.7	4.1	3.1	2.6	3.8	8.8	9.3

$Q_2$  在  $13.8 \sim 35.6 \text{ m}^3/\text{s}$  范围变化,  $Q_2$  对卜型岔洞东、西干隧洞分流比影响较小, 分别在  $0.406$ 、 $0.594$  小幅波动。不同入口流量下, 数值计算与模型试验得到的东、西干分流比见表 7。

表 7 不同入口流量下的分流比

Table 7 Discharge ratio under different inlet flow

入口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	方式	$Q_d/Q_z$	$Q_x/Q_z$	入口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	方式	$Q_d/Q_z$	$Q_x/Q_z$
13.8	数值	0.410	0.590	30.4	数值	0.401	0.599
	试验	0.427	0.573		试验	0.391	0.609
19.6	数值	0.406	0.594	35.6	数值	0.403	0.597
	试验	0.412	0.588		试验	0.398	0.602
25.1	数值	0.403	0.597				
	试验	0.405	0.595				

注：模型试验入口流量已换算为原型流量。

由表 7 可知，入口流量为  $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $25.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35.6 \text{ m}^3/\text{s}$  时，东干隧洞分流比误差分别为 4.1%、1.5%、0.5%、2.5%、1.2%。入口流量为  $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ，误差最大为 4.1%。通过数值计算与模型试验得到的东、西干分流比误差较小，在合理范围内。

## 5 结 论

本文对岔洞段充水阶段  $t = 36 \text{ s}$  时刻水流平稳后岔洞段水流特性进行了研究，对岔洞夹角  $15^\circ \sim 75^\circ$  范围内岔洞充水阶段进行了数值计算，并通过数值计算与模型试验相论证的方法研究了岔洞夹角  $53^\circ$  下充水阶段水流平稳后各监测断面水深及支洞流量比。主要研究结果如下：

(1) 东干分流比随岔角增大而减小，岔洞夹角从  $15^\circ$  增至  $45^\circ$ ，东干分流比由 0.423 减小为 0.399，下降了 25%；岔洞夹角从  $45^\circ$  增至  $60^\circ$ ，东干分流比下降 5.7%；岔洞夹角从  $60^\circ$  增至  $75^\circ$ ，东干分流比变化较小，下降 1.2%。

(2) 总干入口流量对分流比影响较小，岔洞夹角  $53^\circ$  时，东干、西干分流比分别在 0.406、0.594 小幅波动。

(3) 岔洞夹角不变，总干入口流量增加，隧洞段沿程水面线变化趋势相同，同一断面，水位随入口流量增加而增加。岔角改变对总干水位变化影响较小。

(4) 岔角在  $45^\circ \sim 60^\circ$  范围， $z = 0.2 \text{ m}$  平面岔洞段水流平顺，岔角为  $60^\circ$  时，东干入口段外侧  $z = 0.4 \text{ m}$  平面有回流区。

## 参考文献：

- [1] LUO H, DIMITRIOS K F, ARTHUR R S, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses[J]. Advances in Water Resources, 2018, 117(2018): 120-139.
- [2] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇, 等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7-12. (MAO Z Y, ZHAO S W, LUO S. et al. Study on the separation zone in open-channel junction[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 7-12. (in Chinese))
- [3] 杨青远, 周苏芬, 卢伟真, 等. 明渠交汇水流阻力对平面二维数值模拟的影响[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 236-242. (YANG Q Y, ZHOU S F, LU W Z, et al. Influence of additional resistances on numerical simulation of 2 D flow at river channel confluences[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 236-242. (in Chinese))
- [4] BAZIN P, BESSETTE A, MIGONT E, et al. Influence of detailed topography when modeling flows in street junction during urban flooding[J]. J Disaster Res, 2012, 7(5): 560-566.
- [5] 陈启刚, 钟强, 李丹勋, 等. 明渠弯道水流平均运动规律试验研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 369-375. (CHEN Q G, ZHONG Q, LI D X, et al. Experimental study of open channel flow in a bend[J]. Advances in Water Science, 2012, 23

- (3): 369-375. (in Chinese))
- [6] 郭维东, 张春雷, 伯彦萍, 等. 分流比及取水角度对弯道引水口水流流场的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 191-199. (GUO W D, ZHANG C L, BO Y P, et al. The impact of split ratio and diversion angle on the flow field in curve diversion port[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 191-199. (in Chinese))
- [7] 陆彦, 周倪凯, 陆永军. 不同渗流强度对明渠水流结构影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 230-235. (LU Y, ZHOU N K, LU Y J. Experimental investigation of different seepage effects on open-channel flow structure[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 230-235. (in Chinese))
- [8] 吴永妍, 陈永灿, 刘昭伟. 明渠收缩过渡段流速分布及紊动特性试验[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 346-355. (WU Y Y, CHEN Y C, LIU Z W. Experimental study on velocity profile and turbulence characteristics in open channel contractions[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 346-355. (in Chinese))
- [9] 吴永妍, 刘昭伟, 陈永灿, 等. 梯形明渠-马蹄形隧洞过渡段流动形态与局部水头损失研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 46-55. (WU Y Y, LIU Z W, CHEN Y C, et al. Flow characteristics and minor losses in transition section from trapezoidal open channel to horseshoe-shaped tunnel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 46-55. (in Chinese))
- [10] ADRLAN R J, MARUSIC I. Coherent structures in flow over hydraulic engineering surfaces[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(5): 451-464.
- [11] 张鹏, 杨胜发, 胡江, 等. 明渠湍流涡运动尺度分布特性[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 91-98. (ZHANG P, YANG S F, HU J, et al. Distribution of motion scales of vortices in turbulent open channel flow[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 91-98. (in Chinese))
- [12] 杨胜发, 张鹏, 胡江, 等. 明渠均匀流 Q 结构分布及运动特性[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 430-438. (YANG S F, ZHANG P, HU J, et al. Distribution and motion characteristics of Q-events for open-channel uniform flow[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 430-438. (in Chinese))
- [13] LI C W, ZENG C. 3D Numerical modeling of flow divisions at open channel junctions with or without vegetation[J]. Advance in Water Resources, 2009, 32: 49-60.
- [14] 王村, 王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 816-822. (WANG C, WANG C. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 816-822. (in Chinese))
- [15] 吴福生, 王文野, 姜树海. 含植物河道水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 456-461. (WU F S, WANG W Y, JIANG S H. Hydrodynamics development in vegetated open channel[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 456-461. (in Chinese))
- [16] 王晓玲, 段琦琦, 佟大威, 等. 长距离无压引水隧洞水气两相流数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 596-601. (WANG X L, DUAN Q Q, TONG D W, et al. Numerical simulation of water vapor and gas two phase flow in long distance non-pressure diversion tunnel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 596-601. (in Chinese))
- [17] 杨开林, 时启燧, 董兴林. 引黄入晋输水工程充水过程的数值模拟及泵站充水泵的选择[J]. 水利学报, 2000(5): 76-80. (YANG K L, SHI Q S, DONG X L. Numerical simulation of water filling in Yellow River diversion project and selection of pumping station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(5): 76-80. (in Chinese))
- [18] 王克忠, 邓浩浩, 茹荣. 无压引水洞岔洞水力模型试验及仿真分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 65-74. (WANG K Z, DENG H H, RU R. Experimental study and 3-D numerical simulation on water-filling process of free-flow tunnel of diversion, 2018, 37(11): 65-74. (in Chinese))
- [19] 于跃, 王晨晨, 安娟, 等. 基于 VOF 法的长距离无压引水隧洞充水过程模拟[J]. 水利水电技术, 2009, 40(4): 36-40. (YU Y, WANG C C, AN J, et al. Numerical simulation on water-filling process of long-distance non-pressure water diversion tunnel based on VOF method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(4): 36-40. (in Chinese))
- [20] 冉聃, 王文娥, 胡笑涛, 等. 梯形喉口无喉道量水槽水力性能分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 236-244. (RAN D J, WANG W E, HU X T, et al. Analyzing hydraulic performance of trapezoidal cutthroat flumes[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 236-244. (in Chinese))

## Hydraulic characteristics of non-pressure branch tunnel during the water filling stage\*

WANG Kezhong<sup>1</sup>, DENG Haohao<sup>1</sup>, LI Zhaocui<sup>2</sup>, WANG Xuecheng<sup>3</sup>

(1. *Architectural Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;*

2. *Water Supply Management Office of Rizhao, Rizhao 276800, China;*

3. *Shandong Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Ji'nan 250013, China)*

**Abstract:** The long-distance, non-pressure branch tunnel is a hydraulic structure that affects the flow regime and discharge ratio. In the water-filling stage, there are complex flow regimes in the branch tunnel. In this paper, the numerical simulation calculation in the non-pressure branch tunnel at the water filling stage, considering different inlet flows and diversion angles, was carried out by the FLUENT software. At the same time, the water depth at each monitoring station and the discharge ratio for the branch tunnel, after the water flow is stable for different inlet flows, were verified by the model test. The results show that the inlet flow during the water filling stage has little effect on the discharge ratio, which depends mostly on the diversion angles, between 15° and 45°, considered in the simulation. In addition, a recirculation zone appears in the upper flow outside of the lateral branch when the diversion angle is increased to 60°. The change in the diversion angle has little effect on the main tunnel water surface line. The water level in each tunnel section increases when the inlet flow increases.

**Key words:** water filling stage; diversion angle; discharge ratio; waterline; recirculation zone

---

### 出版伦理与学术不端声明

《水科学进展》作为一本严格执行同行评议的学术性期刊，一直致力于抵制学术不端行为，营造学术期刊良好的学术氛围。为加强科技道德规范，促进科研诚信，提高我国科技工作者和科技期刊编辑出版队伍的职业道德水平，保障我国科技事业的健康发展，期刊编委会声明如下：

(1) 进一步完善同行专家评议机制，从源头上严把论文评审关口，确保学术评价的科学性、权威性和公信力。

(2) 作者所投稿件必须是原创性研究成果，无任何学术不端行为（剽窃、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、重复发表和拆分发表等），符合有关法规和政策的要求，不存在涉密内容；作者在文章中引述他人观点和成果等应注明出处，应对非涉密研究项目获得的经费支持及来源予以标明；所有的作者都应该在工作中有所贡献，作者署名及排序无争议。

(3) 审稿人应严格执行稿件学术质量审查规范，客观、公正、公平对待每篇稿件，严禁审稿人利用审稿谋取私利乃至剽窃所审稿件内容。

(4) 编辑工作应参照出版伦理委员会（COPE）制定的期刊编辑行为准则和实践指南，稿件的送审、录用与拒稿应坚持公平公正原则；编辑有义务保护作者的知识产权，论文发表前不向稿件处理无关人员泄露论文信息。

《水科学进展》编委会

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51679215).