

双洞双弯长陡坡导流隧洞明满交替流水力特性研究

何永胜¹, 任坤杰^{2,4}, 严伟¹, 蒲宁³, 李学海^{2,4}

(1. 华电西藏能源有限公司, 西藏 拉萨 851400; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010;

3. 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

4. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 双洞双弯长陡坡导流隧洞内, 由于弯道螺旋流的影响, 引起明满交替流流量区间增大, 加之明满交替流的水力特性为非恒定流, 导致洞内明满交替流的界定与导流设计流量的确定难度大幅增加。针对此问题, 基于三维数学模型模拟, 阐述洞内流态由明流经明满交替流转变为有压流的过程; 提出携气有压流归为有压流范畴且作为明满交替流与有压流的分界流态; 明确明满交替流的水力特征: 上游相对作用水头为 1.61~2.40; 流态为自由面不连续且随时空变化; 同一流量下库水位波动较大, 内侧隧洞分流比随之呈正向变化, 而外侧隧洞分流比则呈反向变化; 沿程压力特性呈现有压流特性与明流特性交替变化, 作用压力紊动性强。

关键词: 长陡坡导流隧洞; 双洞双弯; 明满交替流; 压力特性; 分流比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)01-0062-07

Hydraulic Characteristics of Mixed Free-Surface-Pressure Flow in the Long Steep Slope Diversion Tunnel with Double Tunnels and Double Bends

HE Yongsheng¹, REN Kunjie^{2,4}, YAN Wei¹, PU Ning³, LI Xuehai^{2,4}

(1. Huadian Tibet Energy Co., Ltd., Lhasa, Xizang 851400, China; 2. Yangtze Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430010, China;

3. East China Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

4. Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In the long steep slope diversion tunnel with double tunnels and double bends, the spiral flow in the upper and lower bends could increase the flow range of mixed free-surface-pressure flow and the unsteady influence of the hydraulic characteristics lead to increasing the difficulty of defining mixed free-surface-pressure flow and determining the diversion design flow. Based on the simulation of a three-dimension mathematical model, the process of changing the flow pattern in the tunnel from free surface flow to mixed free-surface-pressure flow, and then to pressure flow is described. It is proposed that the gas-carrying pressure flow is classified as pressure flow and is regarded as the boundary flow pattern between mixed free-surface-pressure flow and pressure flow. The hydraulic characteristics of mixed free-surface-pressure flow are defined. The relative acting head range of upstream is 1.61~2.40. The flow pattern is discontinuous on the free surface and changes with time and space. At the same discharge, the reservoir water level fluctuates greatly, and the diversion ratio of the inner tunnel changes in a positive direction, while the diversion ratio of the outer tunnel changes in a reverse direction. The pressure characteristics along the way show alternating changes of pressure flow characteristics and open flow characteristics, and the action pressure turbulence is strong.

Keywords: diversion tunnel with long steep slope; double tunnels and double bends; mixed free-surface-pressure flow; pressure characteristics; diversion ratio

收稿日期: 2023-08-10

修稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“陡坡隧洞明满交替流水力特性研究”(51279014); 中央级科研院所基本业务费项目“引调水工程渠道输水能力提升降糙材料与关键技术研究”(CKSF2023317+SL)

作者简介: 何永胜(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事水电建设管理、水电移民管理等方面工作。E-mail: heyongsheng@chd.com.cn

通讯作者: 任坤杰(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学等方面工作。E-mail: renkj0904@126.com

导流隧洞是大型水利水电工程常用导流建筑物,隧洞进口一般为侧向进流,如遇大纵坡顺直河道,为适应河势将导流隧洞布置为上下弯道与直线相结合的双弯陡坡($i > i_k$, i 为洞身底坡, i_k 为临界坡)隧洞,加之工程区洪峰流量较大,则需布置两条或多条隧洞导流。对于双洞双弯长陡坡导流隧洞,因弯道螺旋流、两洞分流比变化等因素,导致明满交替流流量区间增大,使洞内水流特性更为复杂,致其流态界定与设计流量确定更为困难。

目前关于电站尾水隧洞明满交替流水力特性的研究成果较多。许景贤等^[1]研究了二滩水电站发电尾水洞中非恒定流条件下明满流的水力特性;褚宝鑫等^[2]、唐新发等^[3]、樊红刚等^[4]通过建立明满交替流数学模型研究了尾水隧洞中明满流的压力脉动过程;张宗溥等^[5]、孙洪亮等^[6]采用特征隐格式的虚拟狭缝法模拟分析了尾水隧洞内明满流对机组稳定性及尾水调压室水位波动的影响;刘敏等^[7]、史晓阳等^[8]采用 VOF 气液两相流模型对尾水系统进行了数值模拟,揭示了尾水隧洞发生明满流时洞底压力变化幅度较大且持续时间长的规律,通气孔风速变化规律等;何相慧等^[9]采用基于虚拟狭缝法的一维计算和基于 VOF 模型的三维计算研究了电站尾水隧洞过渡过程中的调压室涌浪、明满流分界面移动等问题。而针对导流隧洞明满交替流水力特性研究相对较少。马吉明^[10]针对弯道隧洞明满流水力特性开展了系列模型试验研究,提出水位升降顺序影响明满交替流流量区间,明满交替流流量可用有压流公式计算,流量系数近似取为常数等;李学海等^[11]针对影响明满流形成的主要影响因素进行了系统分析研究;李衡等^[12]利用陡坡导流隧洞物理模型研究了导流隧洞进口形式对隧洞泄流能力与洞内流态的影响;王威等^[13]通过物理模型试验研究了变坡长隧洞明满流水力特性研究,阐述了变坡长导流隧洞洞内流态的演变过程,提出了明满交替流的流量系数介于无压流和有压流流量系数之间,探讨了明满交替流的压力波动规律。以上针对导流隧洞明满交替流研究均采用模型试验方法,模型试验的缩尺效应导致库水位与过流能力、流态、压力特性的不匹配,即使依据糙率相似进行修正,也仅仅能对过流能力或压力特性修正,修正后的过流能力、压力特性与流态是不匹配的,因此有必要通过数值模拟方法研究原型导流隧洞明满交替流水力特性。目前关于双洞双弯长陡坡导流隧洞明满交替流的研究成果鲜见,其因弯道螺旋流与分流比变化与长直陡坡隧

洞明满交替流流态存在较大差异,因此研究双洞双弯长陡坡导流隧洞内明满交替流水力特性具有一定的理论价值与实际意义。

本文通过三维数学模型探讨双洞双弯长陡坡导流隧洞内明满交替流发生及其水力特性,为该类型隧洞设计确定流量与隧洞安全运行提供科学依据。

1 工程概况

某导流隧洞工程的导流洞布置,为内侧 1#洞和外侧 2#洞平面双弯道布置,由进口段、上直段、上弯段、中直段、下弯段、下直出口段组成。2 条隧洞断面为城门洞形,断面尺寸为 15.0 m × 17.0 m,1#洞长 790 m,底坡 0.79%,2#洞长 980 m,底坡 0.63%,坡度均大于临界底坡,隧洞壁面糙率 0.013。

2 数学模型

2.1 基本方程

基于 N-S 方程,采用三维 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型模拟隧洞内水流流场。RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型引入了可变系数,可提高存在较大流速梯度的流场计算精度^[14]。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

κ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \right] + C_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

式中: ρ 为水密度; t 为时间; u_i, u_j, x_i, x_j 分别为速度分量与坐标分量; μ, μ_t 分别为动力粘性系数与紊流粘性系数; $\mu_t = C_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon$; p 为压力; f_i 为质量力; κ 为湍动能; C_κ 为平均速度梯度产生的紊动能项, $C_\kappa = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$; ε 为湍动能耗散率;经验常数 $C_u = 0.09, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。

2.2 模拟范围、边界条件与网格划分

模拟范围包括上游 300 m 河道(含上游围堰),导流隧洞引水渠、内侧 1#、外侧 2#隧洞(含进口门井)、出口引水渠及下游 420 m 河道等。上游河道模拟最大高程较隧洞进口高 55 m,上游围堰顶较隧洞进口高 50 m,隧洞进、出口落差 6 m,下游河道(含下游围堰)模拟最大高程较隧洞出口高程高 15 m。进口门井顶部不封闭,上游水位超过门井顶高程时门井自由串流,模拟范围如图 1 所示。

上游河道来流入口给定流量边界,下游河道出口给定水位边界,壁面采用壁面函数模拟为无滑移固壁边界,壁面糙率 0.013,设定壁面粗糙高度。

全域采用计算精度较高的六面体网格进行划分,网格总数 650 万。库区水平方向最大网格尺度 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,水深方向最大网格尺度 0.5 m;引水渠道段水平方向最大网格尺度 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,水深方向最大网格尺度 0.5 m;隧洞段水平向最大网格尺度 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,水深方向最大网格尺度 0.3 m。

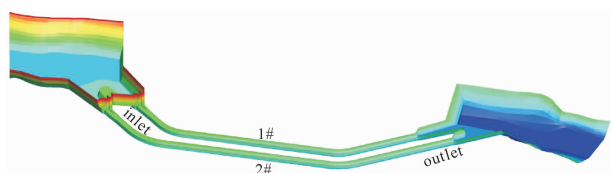


图 1 导流隧洞模拟范围

2.3 方程求解

采用有限体积法对控制方程进行离散,采用 VOF 方法实现自由面的追踪。采用 PISO 算法解决速度与压力的耦合,该算法可提高计算效率,对瞬态问题计算具有明显优势^[14]。

3 导流隧洞流态转变分析

隧洞过流时下游水位低于隧洞顶高程,隧洞出口为自由出流。上游相对作用水头与流量之间的关系曲线如图 2 所示,导流隧洞门井后洞身段明流、明满交替流、有压流流态如图 3—图 5 所示。

3.1 明流流态

上游相对作用水头 $H/a < 1.61$ (H 为隧洞进口断面底板高程算起的上游水深, a 为洞高),门井后洞段流态为明流。随来流量增大,上游水位抬高,洞内水面变得越来越狭窄。当上游来流量相对较小,库区水流自由面与隧洞进口门井前后洞段自由面连续,门井前、后洞段流态均为明流(见图 3(a));当来流量增大,门井前库区与门井后自由面断开,说明

门井前洞段流态为有压流,而门井后洞段流态为明流(见图 3(b))。门井后洞段自由表面形成不规则的冲击波,特别是弯道处水流受纵向惯性力与横向离心力的作用呈螺旋运动,外侧水流斜向冲击内侧洞壁而水面扭曲,在横向上水面内低外高。同一导流隧洞,上弯道内外水位差较下弯道小;外侧(2#)导流隧洞弯道内外水位差较内侧(1#)导流隧洞小(见图 3)。

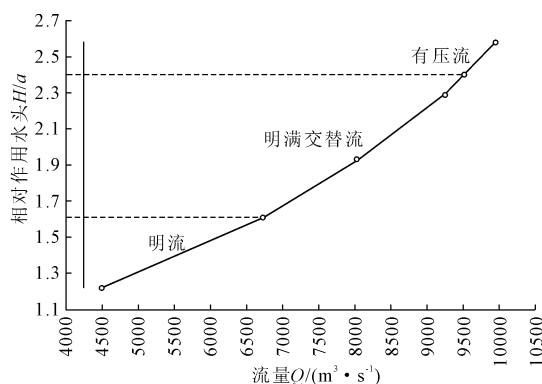


图 2 上游相对作用水头与流量关系曲线图

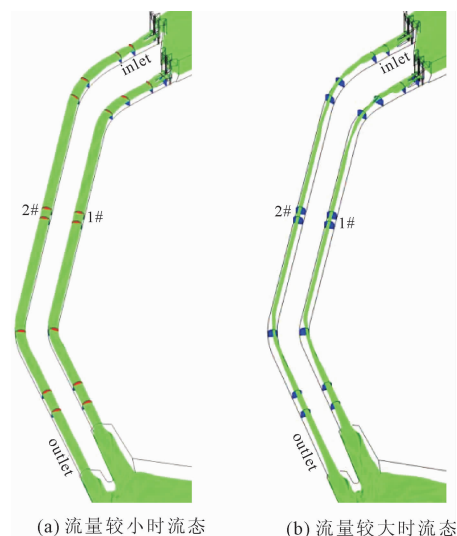


图 3 导流隧洞内明流流态

3.2 明满交替流流态

上游相对作用水头 H/a 区间为 1.61 ~ 2.40,门井后洞段流态为明满交替流,基于门井后洞段明流流态,来流量继续增大,上游水位继续抬升,门井后洞段自由面变得不连续,且随时间变化,洞内自由面位置发生迁移,形成有压与无压并存且随时间相对位置发生变化的明满交替流流态。此时,空气由门井进入隧洞,门井后两隧洞顶部形成较为稳定的负压空腔,气体以气囊的形式不断的向隧洞下游游移,

在弯道处气囊沿顶部偏内侧向下游游移。在气囊游移过程中,上游水位在一定范围内上下波动,隧洞泄流能力也发生变化(见图4)。

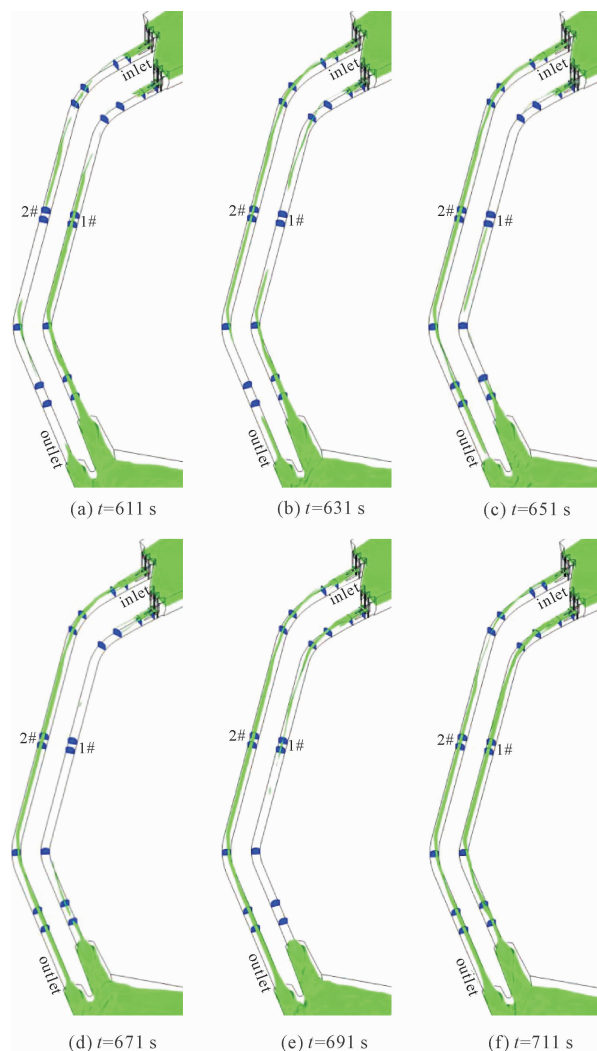


图4 导流隧洞内明满交替流状态

3.3 有压流状态

上游相对作用水头 $H/a > 2.40$, 全洞为有压流状态。基于门井后洞段明满交替流状态, 随着流量加大, 上游水位升高越至门井以上, 门井成为过流通道, 门槽顶部两侧水面形成贯通立轴吸气旋涡, 水流携气通过门井进入隧洞, 洞内呈现无明显自由面的携气有压流状态(见图5(a)); 随着流量加大, 上游水位进一步抬升, 门井淹没度增大, 门槽顶部贯通性漩涡转变为表面无吸气漩涡, 全洞呈有压流状态(见图5(b))。

文献[15]提到, 陡坡隧洞上游相对作用水头 $H/a = 1.2 \sim 1.5$ 为半有压或不稳定流态, $H/a > 1.5$ 为有压流状态。文献[6]中, 一般直隧洞明满交替

流进口相对作用水头 $H/a = 1.1 \sim 1.5$, 而弯道陡坡隧洞明满交替流范围 $H/a = 1.4 \sim 2.7$; 而本文得到的双洞双弯长陡坡隧洞明满交替流范围 $H/a = 1.61 \sim 2.40$ 。由此可见, 较一般陡坡导流隧洞, 弯道陡坡隧洞明满交替流相对作用水头范围较大, 流量区间亦大。

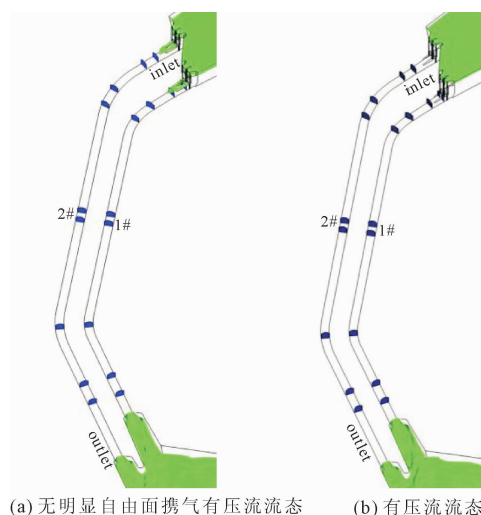


图5 导流隧洞内有压流状态

4 导流隧洞压力分布

4.1 明流流态压力分布

门井后洞段为明流流态, 洞内压力如图6所示, 隧洞底部沿程压力呈减小趋势。门井经渐变段至上直段, 过流面积减小, 流速增大, 压力降低; 至上弯段, 主流偏于外侧, 中部水流流速减小, 压力先升高再减小, 有小幅波动; 至直段及以下洞段, 压力分布沿程呈小幅度衰减趋势, 下弯段与上弯段类似, 压力有小幅波动, 出口断面压力突降。内侧1#导流隧洞因洞长较短、底坡较大、泄流量较大, 沿程压力衰减幅度较外侧2#导流隧洞大。门井后洞段呈明流流态, 隧洞底部沿程压力分布特性表征为沿程小幅度衰减趋势。

4.2 有压流流态压力分布

门井后洞段为有压流流态, 洞内压力如图7和图8所示, 隧洞底部沿程压力: 上弯段及其上游压力分布规律与明流流态基本一致; 而直段及以下洞段底部压力沿程衰减幅度增大。隧洞顶部沿程压力: 门井经渐变段至上直段压力升高; 上弯段及以下洞段压力分布呈大幅度衰减趋势, 出现大范围负压, 上、下弯段, 压力有小幅升降, 出口断面压力回升至零压附近。因上游水位超过门井顶高程时, 门井串

流垂直入汇与隧洞正常高速来流相遇,串流水体在下游产生绕流,水流脱壁在门井下游附近(桩号 0 + 00)洞顶产生较大负压,在其下游可能发生空蚀破坏。下泄最大流量时,洞内流速 30 m/s,洞顶负压

值高达 8.5×9.81 kPa,实际运行时可以考虑封闭门井避免串流。门井后洞段呈有压流流态,隧洞底板与顶部沿程压力分布特性表征为沿程呈大幅度衰减趋势。

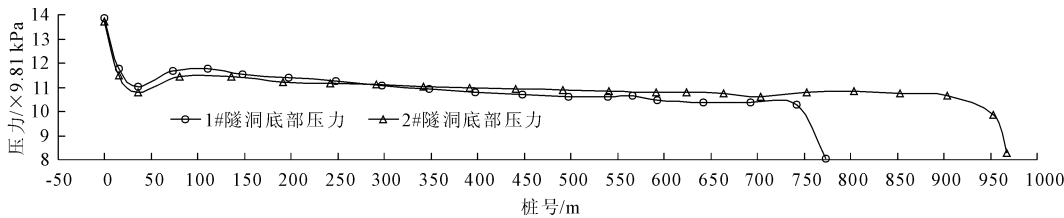


图 6 导流隧洞底部沿程压力分布 (明流)

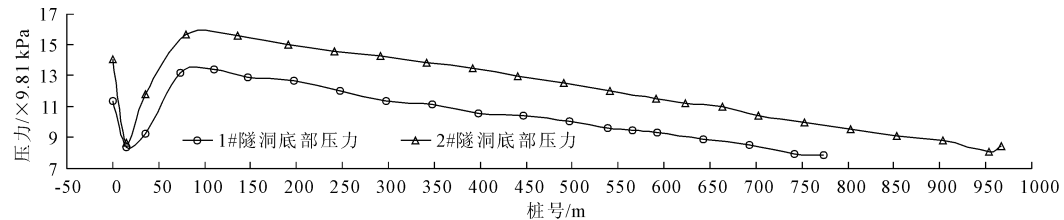


图 7 导流隧洞底部沿程压力分布 (有压流)

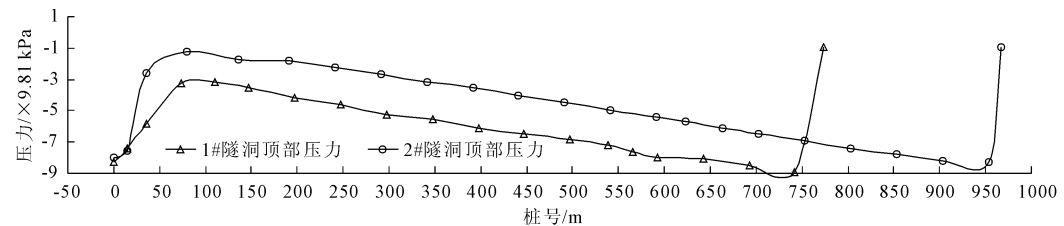


图 8 导流隧洞顶部沿程压力分布 (有压流)

4.3 明满交替流流态压力分布

门井后洞段为明满交替流流态,洞内压力如图 9—图 10 与表 1 所示。

$t = 611 \text{ s} \sim 651 \text{ s}$,上游水位降低,变幅 0.68 m,内侧 1#隧洞分流比减小,由 0.495 降至 0.484,底、顶部压力一直呈明流特性;顶部压力呈小负压接近零压分布;外侧 2#隧洞分流比增大,由 0.505 增至 0.516,底、顶部压力特性由明流特性过渡至有压流特性。

$t = 651 \text{ s} \sim 671 \text{ s}$,上游水位升高,变幅 0.54 m,内侧 1#隧洞分流比增大,由 0.484 增至 0.501,底、顶部沿程压力特性由明流特性过渡至有压流特性;外侧 2#隧洞分流比减小,由 0.505 降至 0.499,底、顶部沿程压力特性由有压流特性过渡至明流特性。

$t = 671 \text{ s} \sim 711 \text{ s}$,上游水位降低,变幅 0.40 m,内侧 1#隧洞分流比减小,由 0.501 降至 0.484,底、顶部压力特性由有压流特性过渡至明流特性;外侧 2#隧洞分流比增大,由 0.499 增至 0.516,底、顶部沿程压力分布一直呈明流特性。

因此,双洞明满交替流时压力分布特性:随上游水位升降,内侧 1#洞分流比呈正向变化,外侧 2#洞分流比呈反向变化,压力特性均呈明流特性-有压流特性-明流特性的交替变化。两洞压力特性可同时呈现明流特性或一洞明流一洞有压流特性,且明流特性呈现时间较长。洞内水流作用压力紊动性较强,特别是上下弯道段压力波动幅度达 6×9.81 kPa,长时间处于此流态下极易造成隧洞衬砌结构的疲劳破坏。

表 1 导流隧洞内明满交替流隧洞底、顶部沿程压力特性

时刻/s	1#隧洞	2#隧洞
611	明流特性	明流特性
631	明流特性	有压流特性
651	明流特性	有压流特性
671	有压流特性	明流特性
691	有压流特性	明流特性
711	明流特性	明流特性

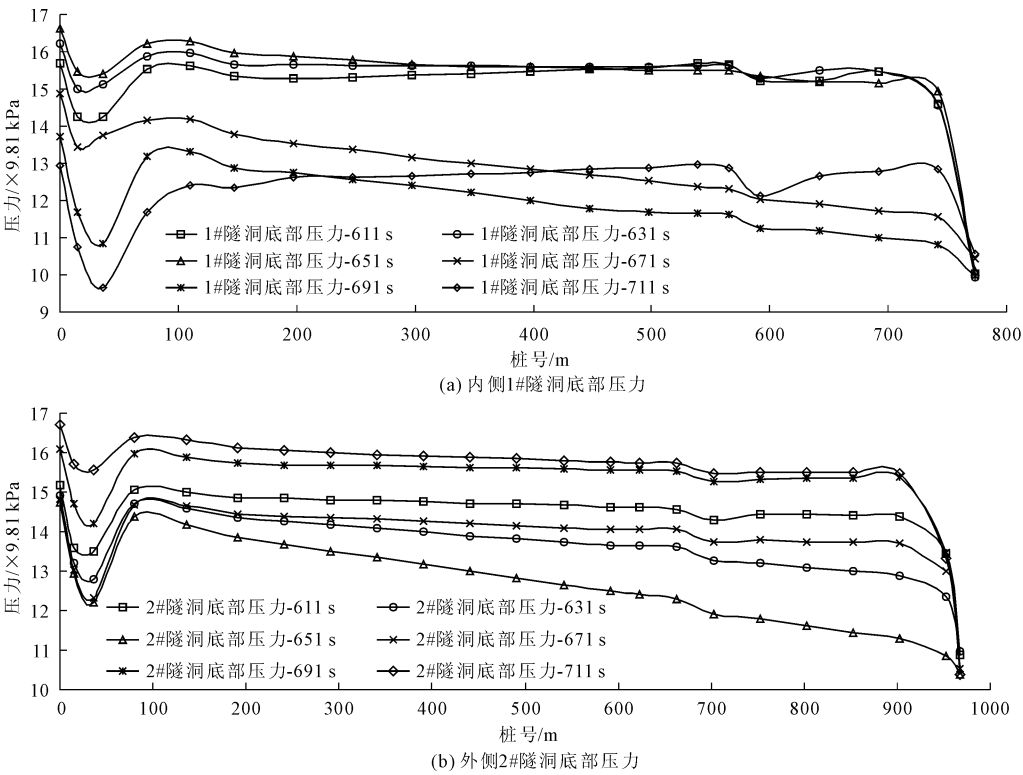


图 9 不同时刻导流隧洞底部沿程压力分布 (明满交替流)

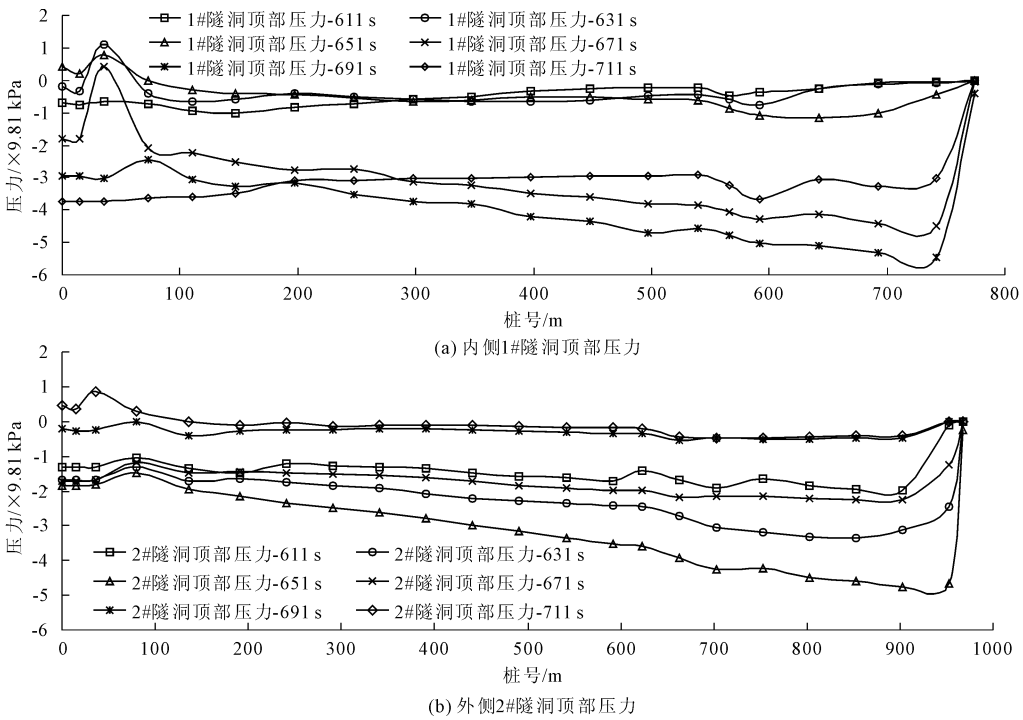


图 10 不同时刻导流隧洞顶部沿程压力分布 (明满交替流)

5 结 论

采用三维数学模型研究了双洞双弯长陡坡导流隧洞明满交替流发展过程与水力特性的变化规律,

得到以下结论:

(1) 来流量增大上游水位抬高,隧洞门井后洞段依次出现明流、明满交替流、有压流等流态,提出携气有压归为有压流范畴,且作为明满交替流与有

压流的分界流态。

(2) 上游相对作用水头 H/a 区间为 1.61 ~ 2.40, 门井后洞段流态为明满交替流。

(3) 门井后洞段呈明满交替流流态, 洞内自由面不连续, 且随时空而变化; 处于明满交替流的同一流量下, 上游水位发生波动, 随水位升降, 内侧洞分流比呈正向变化, 外侧洞分流比呈反向变化, 压力特性均呈明流特性-有压流特性-明流特性的交替变化。两洞压力特性可同时呈现明流特性或一洞明流一洞有压流特性, 且明流特性呈现时间较长。

(4) 洞内处于明满交替流时, 洞内水流作用压力紊动性强, 特别是上下弯道段压力波幅可达 $6 \times 9.81 \text{ kPa}$, 应考虑该压力波动对混凝土结构的影响。

参考文献:

- [1] 许景贤, 林斌良. 二滩水电站尾水隧洞过渡过程中明满流的试验研究[J]. 水力发电学报, 1990, 31(4): 58-70.
- [2] 褚宝鑫, 樊红刚, 陈乃祥. 具有明满交替流大型水电站的动态数值模拟及优化设计研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 166-170.
- [3] 唐新发, 陆锡赋, 樊泓刚, 等. 百色水电站尾水隧洞明满交替流动计算研究[J]. 红水河, 2006, 25(1): 33-37.
- [4] 樊红刚, 陈乃祥, 杨琳, 等. 明满交替流动计算方法研究及其实验验证[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 16-20.
- [5] 张宗溥, 花玉龙, 程欢. 导流洞改建尾水洞明满流过

渡过程数值模拟[J]. 人民长江, 2015, 37(4): 105-108.

- [6] 孙洪亮, 杨飞, 李高会, 等. 白鹤滩尾水隧洞明满流对水电站稳定性的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 165-168.
- [7] 刘敏, 蔡付林, 张雯, 等. 通气孔对具有明满流尾水隧洞过渡过程的影响[J]. 中国农村水利水电, 2014(2): 150-152, 156.
- [8] 史晓阳, 杨玉峰, 赵子杰, 等. 基于 VOF 方法的尾水隧洞过渡过程明满流水力特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(1): 78-88.
- [9] 何相慧, 杨桀彬, 杨建东, 等. 乌东德水电站明满流尾水洞瞬态水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 176-181.
- [10] 马吉明. 弯道隧洞内的明满流现象及有关水力学问题[J]. 红水河, 1997, 16(1): 23-24.
- [11] 李学海, 李 蓓, 石教豪. 陡坡隧洞明满交替流成因及改善措施[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(8): 40-45.
- [12] 李 蓓, 李学海, 杜泽金. 陡坡隧洞不同进口形式的水力特性分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(1): 38-41.
- [13] 王 威, 吴时强, 黄 标, 王芳芳. 变坡长隧洞明满流水力特性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 94-98.
- [14] 刘火箭, 徐唐锦, 宛良朋, 等. 乌东德 5 号导流隧洞改建体型水力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 118-123.
- [15] 李 炜. 水力计算手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 319.



(上接第 61 页)

- [24] Oltulu M, Sahin R. Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 658-664.
- [25] Zhang Lunchao, Zhou Jikai. Fractal characteristics of pore structure of hardened cement paste prepared by pressurized compact molding [J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119856.
- [26] Li Pengfei, Sun Qiang, Hu Jianjun, et al. Effect of the pore structure of granite and gabbro after heat treatment

on the radon emission rate[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(24): 36801-36813.

- [27] Yang Jin, Huang Jianxiang, He Xingyang, et al. Segmented fractal pore structure covering nano-and micro-ranges in cementing composites produced with GGBS [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 1170-1182.
- [28] Yang Xu, Dai Hongzhe. Effect of geometric form of concrete meso-structure on its mechanical behavior under compression[J]. Powder Technology, 2020, 360: 372-382.