

# 岩溶隧道开挖围岩地下水位变化规律模型试验研究

刘文刚<sup>1</sup>, 邹蔚<sup>2</sup>, 纪亚英<sup>3</sup>

(1. 中铁十九局集团第三工程有限责任公司, 北京 110136; 2. 蜀道投资集团有限责任公司, 成都 610095;

3. 四川藏区高速公路有限责任公司, 成都 610041)

**摘要:** 岩溶隧道开挖后, 地下水通过导水裂隙进入隧道内, 引起隧道周围水压变化, 常造成隧道涌突水灾害, 危及隧道工程与周围环境安全。为揭示岩溶隧道开挖引起的水环境变化特征, 依托大永高速莲峰隧道工程, 通过自制的试验材料与物理模型装置, 表征隧址区围岩渗透系数, 开展含水平裂隙岩溶隧道开挖模型试验, 监测开挖过程中围岩水压变化。试验结果表明: (1) 隧道开挖过程中, 隧道围岩地下水通过渗流方式涌入隧道, 各测压管水位均有不同程度下降。(2) 越接近隧道轴线, 水位下降速度越快, 在稳定时刻的水位高程也越低。(3) 同一时刻相同高程测点水位形成的曲线显示出典型降落漏斗形态特征。

**关键词:** 裂隙渗流; 模型试验; 水压变化; 降落漏斗

**中图分类号:** P642; TV12; U459.2; TV131.61 **文献标识码:** A

## MODEL TEST STUDY ON VARIATION OF GROUNDWATER LEVEL IN SURROUNDING ROCK DURING KARST TUNNEL EXCAVATION

LIU Wen-gang<sup>1</sup>, ZOU Wei<sup>2</sup>, JI Ya-ying<sup>3</sup>

(1. China Railway 19TH Bureau Group Third Engineering Corporation Limited, Beijing 110136, China;

2. Shudao Investment Group Co., LTD., Chengdu 610095, China;

3. Sichuan Tibetan Area Expressway Co., LTD., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Groundwater enters the tunnel through the fissure and causes the change of water pressure around the tunnel after the excavation of karst tunnel. These changes often causes the disaster of water gushing and endangers the safety of tunnel engineering and surrounding environment. In order to reveal the variation characteristics of water environment caused by karst tunnel excavation, based on Lianfeng Tunnel project of Dayong high-speed road, the permeability coefficient of surrounding rock in tunnel site was characterized by self-made test materials and physical model device. The model test of karst tunnel excavation with horizontal fissure was carried out to monitor the change of surrounding rock water pressure during excavation. The test results show that (1) groundwater flows into the tunnel in the seepage way under the excavation process, and the water level at the pressure measuring pipes decreases with different degrees; (2) The closer the tunnel axis is, the faster the water level drops and the lower the water level elevation at the stable moment is; (3) The water level curve measuring at the same time shows typical drop funnel characteristic.

**Key words:** fissure seepage; model test; water pressure change; drop funnel

随着国家“一带一路”战略持续推进,西南地区铁路、公路、及水电工程建设进入快速发展阶段。然而,西南地区构造活动强烈、地质环境复杂、岩溶地貌发育<sup>[1-2]</sup>,工程穿越岩溶地区面临严峻的隧道地质灾害风险<sup>[3-5]</sup>。

岩溶区隧道开挖揭穿岩溶含水层,将导致原有应力场、渗流场重分布,极易引起涌水突泥地质灾害,破坏隧址区生态环境等问题<sup>[6-7]</sup>。刘强等<sup>[8]</sup>利用自主研发的室内模型试验系统,开展了水下隧道渗流场变化研究,总结了隧道在不同排水方式下注浆圈和衬砌背后水压分布规律;袁金秀等<sup>[9]</sup>依托邢和铁路天河山隧道,基于地下水动力学理论,预测了隧道衬砌背后水压力;黄昕等<sup>[10]</sup>建立三维流固耦合精细化有限元模型,探究了不同施工阶段水下盾构隧道开挖引起的渗流场和位移场演化模式;刘丹等<sup>[11]</sup>依托华蓥山隧道工程,研究了隧道渗水与形成的降落漏斗特征;陈仲达等<sup>[12]</sup>基于 COMSOL 软件,研究了不同溶腔水压、不同填充介质、不同管道宽度、不同管道长度条件下隧道突水过程中流体速度和压力的变化规律。

为了揭示岩溶隧道开挖引起的水环境变化规律,本文依托大永(大关-永善)高速公路莲峰隧道工程,通过自制的试验材料与物理模型装置,等效模拟隧道围岩渗透特征,开展含水平裂隙岩溶隧道开挖

模型试验,监测开挖过程中围岩水压变化。

## 1 工程背景

莲峰特长隧道位于昭通市永善县墨翰乡、莲峰镇,是大永(大关-永善)高速公路核心控制性工程。隧道呈近直线形展布,左线隧道起讫桩号 ZK20+600~ZK31+584,全长 10 984 m,坡度-1.7%,最大埋深约 868.90 m;右线隧道起讫桩号 K20+583~K31+578,全长 11 995 m,坡度-1.7%,最大埋深约 857.96 m。路线经过河谷区、山岭区等多种地形,地质条件复杂,相对高差大,地面横坡陡峻。

莲峰隧道在施工过程中遭遇的最主要工程问题为局部集中涌水。莲峰隧道出口段在 2021 年 12 月 21 日,隧道里程 ZK29+786 处掌子面揭穿了含水裂隙,隧道内发生了严重的涌突水(图 1),其特点为水压高、流量大,造成了隧道施工的中断;12 月 26 日晚掌子面涌水量持续不变;12 月 27 日左边拱腰的水从拱脚冒出来;12 月 28 日,掌子面向小里程方向出现一条纵向裂缝(纵向长度 4~5 m),裂缝内持续流水;12 月 29 日,掌子面向小里程方向出现一条纵向裂缝,裂缝朝向拱顶,裂缝内持续流水;2022 年 1 月 1 日,掌子面里程 ZK29+769,掌子面出现一条纵向裂缝,裂缝从拱顶向右前方延伸,裂缝内持续流水,掉块严重。



图 1 莲峰隧道出口段掌子面 ZK29+769 涌水现场照片

根据超前地质检测结果(图 2),推测莲峰隧道出口 K29+799~K29+774 段围岩节理裂隙发育,岩质较软,岩体破碎,呈碎石状碎裂结构,拱部易掉块,潮湿状或点滴状出水,自稳能力较差。

## 2 物理模型试验

物理模型试验箱主要是由相似材料砌成的围岩、溶腔模拟装置、测压装置组成,主体结构设计如图 3 所示。其中岩层仅考虑水平和垂直裂隙情况,

尺寸为 200 cm×15 cm×150 cm,隧道直径设为 10 cm,隧道下端距离模型底部 67 cm。

在模型底端等距离埋设 2 根长 30 cm、直径 1 cm 的软水管收集渗透涌水,内侧端口用滤纸和纱网包裹缠紧防止细沙进入,外侧端口用止水夹夹住。

模型两侧设计内部尺寸为长×宽×高=20 cm×15 cm×150 cm 的水槽,模拟周边库水、地下河、溶腔等。隧道底部高程以上的部分每隔 10 cm 埋设进水管,水管靠近模型内侧端口要用纱网和滤纸包

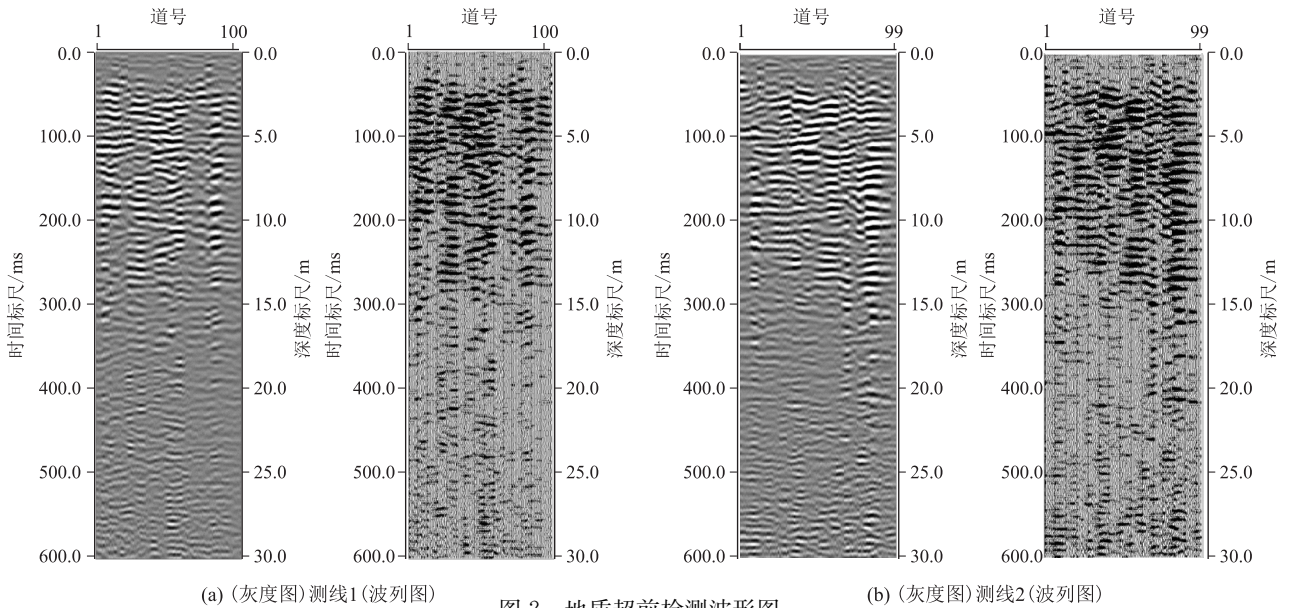


图 2 地质超前检测波形图

裹,防止进水和出水过程中砂进入水槽或者堵塞进水管。水槽底端外侧要预先埋设一根透明水管,长度大于模型高度,沿透明管方向固定软尺一条,方便观测控制水槽内的水位高程并读数。水槽外侧隧道高程以上要与内侧进水口高程一致的对应位置预留 4 个溢水孔用于控制水槽内水位高程,两侧水槽顶部分别设置 1 个进水口。

模型前侧墙体由厚度 15 mm 的玻璃框架构成,玻璃上如图 3 所示钻有允许测压管通过的直径 6 mm 的孔洞,孔侧测压管旁布置软尺用于读数;玻璃左右侧框架与墙体之间用膨胀螺丝链接,并用玻璃胶密封玻璃与墙体之间的缝隙;玻璃下端用混凝土做垫层,使其与地面密封相连。

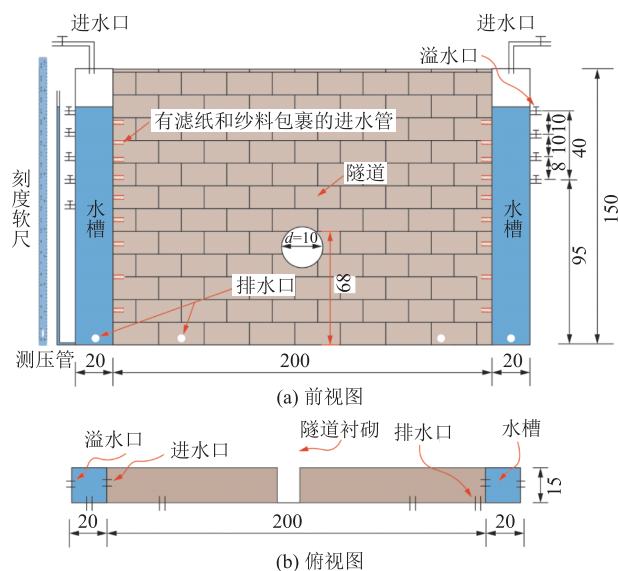


图 3 试验模型箱示意图

### 3 模型试验设计

#### 3.1 试验设计

沿着  $x$  轴从靠近隧道向两侧每隔一定距离埋设透明测压管以便观察在同一时刻,距离隧道  $x$  远处的不同水位高程;在隧道底端每隔一定距离埋设透明测压管以便观察在同一时刻距隧道底端不同距离  $y$  处的水压力情况,具体点位的布置如图 4 所示。

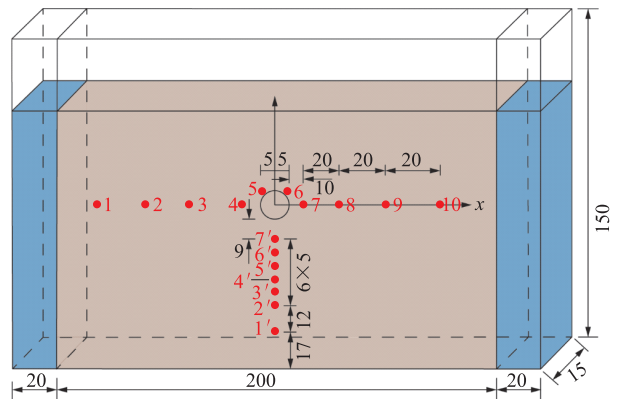


图 4 测压管布置示意图

#### 3.2 相似材料选择

本次试验模拟隧道开挖后周围水压变化,因此材料选择需满足渗透率与围岩相似。莲峰 1 号隧道沿线渗透系数为  $10^{-5}$  cm/s  $\sim$   $10^{-4}$  cm/s,本试验选用其最大值的情况探讨隧道开挖过程中涌水和水位降低的情况随时间变化的关系,普通砖在自然状态下的渗透系数为  $10^{-6}$  cm/s,所以采取将砖打孔然后填充的方式增大其渗透能力,拟钻孔直径 10 mm,打孔位置如图 5 所示。

表1 单块砖钻孔填充后的渗透等效试验数据采集表

试验数据 试验样本	单孔		总水断面 横截面积 $A/\text{cm}^2$	渗径 $L/\text{cm}$	流量 $Q$ (烧杯读 数或称重法换 算得来)/ $\text{ml}$	水头差 $h_i/\text{cm}$	总时长(稳定) $t_i/\text{s}$	计算得 $k_i$ 值 $/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	平均值 $K$ $/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
	半径 $r$ $/\text{cm}$	体积 $C$ $/\text{cm}^3$							
1	0.5	4.5	241.5	5.3	1 965	4.5	15 780	$6.073 \times 10^{-4}$	$6.966 \times 10^{-4}$
2	0.5	4.5	241.5	5.3	2 767	5.0	19 480	$6.236 \times 10^{-4}$	
6	0.5	4.5	241.5	5.3	3 088	6.0	17 540	$6.441 \times 10^{-4}$	
8	0.5	4.5	241.5	5.3	4 923	7.0	19 540	$7.899 \times 10^{-4}$	

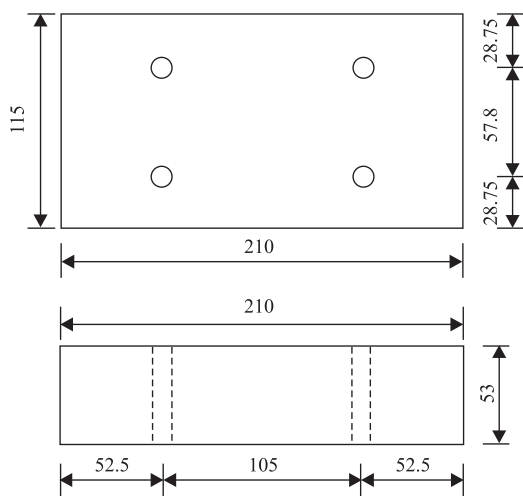


图5 孔与砖的边缘之间的距离

由表1可知,砖在钻孔填充后的渗透系数与计算结果相吻合,满足试验要求。

### 3.3 试验流程

(1) 按照3.2节方法制围岩相似材料,对砖进行钻孔(半径  $r = 5 \text{ mm}$ ),采用粒径  $0.25 \text{ mm} \leq d \leq 5.0 \text{ mm}$  级配良好砂进行填充,每个孔需要填充的标准质量为  $7.2 \text{ g}$ ;砖与砖的层间填充砂的粒径为  $d \leq 5.0 \text{ mm}$ ,每两块砖水平缝之间的填充质量为  $341.25 \text{ g}$ 。

(2) 填充模型内部结构。准备好对层填充时的击实工具,用天平称量  $341.25 \text{ g}$  沙填充砖与砖之间的水平缝,分层逐个砖样完成填充工作。

(3) 埋设测压管,在填充的过程中,按照预先设计(图4)在隧道周围埋设透明测压管。

(4) 安装玻璃墙,将待安装的玻璃板钻直径为  $6 \text{ mm}$  孔洞,以使埋置于模型中的测压管穿过。然后安装上玻璃板,并用准备好的玻璃胶密封玻璃和砖墙之间的缝隙,同时在外侧浇筑混凝土加强密封。在靠近玻璃一侧的空隙内填充与层面具有相同击实程度的砂。

(5) 将测压管用透明玻璃胶固定在玻璃上,并在管的旁边对其张贴软尺。连接进水管,并将制作好的软塞塞入隧道,模拟隧道开挖前的状态。当软

塞取出,相当于隧道开始被开挖。

(6) 按照设计的控制水位高程,由两边水槽缓慢向箱内注入水到最高水位高程,即  $123 \text{ cm}$ 。

(7) 在上述步骤的同时由3人分别负责读取在  $0 \text{ s}$ 、 $15 \text{ s}$ 、 $30 \text{ s}$ 、 $60 \text{ s}$  ( $1 \text{ min}$ )、 $120 \text{ s}$  ( $2 \text{ min}$ )、 $180 \text{ s}$  ( $3 \text{ min}$ )、 $300 \text{ s}$  ( $5 \text{ min}$ )、 $480 \text{ s}$  ( $8 \text{ min}$ )、 $690 \text{ s}$  ( $11 \text{ min}$ )、 $900 \text{ s}$  ( $15 \text{ min}$ )、 $1 200 \text{ s}$  ( $20 \text{ min}$ )、 $1 500 \text{ s}$  ( $25 \text{ min}$ )、 $1 800 \text{ s}$  ( $30 \text{ min}$ )、 $2 400 \text{ s}$  ( $40 \text{ min}$ )、 $3 000 \text{ s}$  ( $50 \text{ min}$ ) 时刻时水平方向和竖直方向测压管的水位高程。

(8) 依次将两侧水位高程降低为  $113 \text{ cm}$ 、 $103 \text{ cm}$ 、 $95 \text{ cm}$ 、 $85 \text{ cm}$ ,反复第八步到第十一步。

(9) 保持左侧水位在最低水位高程  $85 \text{ cm}$ ,依次将右侧水位高程一次抬高一级,形成水力梯度,测压水管水位稳定后,读数记录。共完成梯度  $0.05$ 、 $0.10$  两个工况的试验。

试验过程照片如图6所示。



图6 试验过程照片

## 4 试验结果分析

本试验方案是模拟岩石水平裂隙和垂直裂隙的试验,共完成了  $95 \text{ cm}$ 、 $103 \text{ cm}$ 、 $113 \text{ cm}$ 、 $123 \text{ cm}$  四组两侧补给水位高程相等的常水头控制试验,梯度  $0.05$ 、 $0.10$  两组不同梯度试验。

在试验中,隧道开挖前后涌水现象明显。不同

工况下在隧道 68 cm 高程和 73 cm 高程处各测点的测压管水位在某时刻的水位连线分别如图 7~8 所示,根据不同工况下从试验数据图表中可以看出:

当打开水阀模拟隧道开挖时,隧道两侧水位开始下降,且越靠近隧道周围的测压管中水位下降越快,逐渐形成降落漏斗。从图 7 可以看出当常水头为 95 cm 时,隧道轴线两侧 20 cm 的距离内降落漏斗非常明显,随着涌水稳定,水位最低点几乎在隧道底端高程。随着两侧补给水头升高,影响范围也在扩大,比如到达 123 cm 时,影响范围约与隧道轴线相聚 60 cm,漏斗的形状也越来越细长。

模型是对称的,所以本试验采用向左渗流的有梯度的试验。图 9、图 10 分别是梯度为 0.05 和 0.1

各测点水位随时间变化关系图,图中表明初始时刻,同高程处各点水位的连线近似为一条左低右高的直线。在隧道开挖后,随着时间左右水位均向隧道补给,左侧水位低补给有限,曲线只呈现出细微的向隧道倾斜的趋势;右侧水位高补给能力强,水位下降明显,形成的降落漏斗在隧道左侧影响范围约为 30 cm,在右侧约为 50 cm。

对比图 7 和图 8、图 9 和图 10,68 cm 高程处各点和 73 cm 处各点的水位在同一时刻也存在细微差别,根据试验过程和模型建造情况,这是由于测压管在埋设的时候上下管并没有能够完全保证距离隧道轴线的距离一致,以及介质填充存在不可避免的误差引起的。

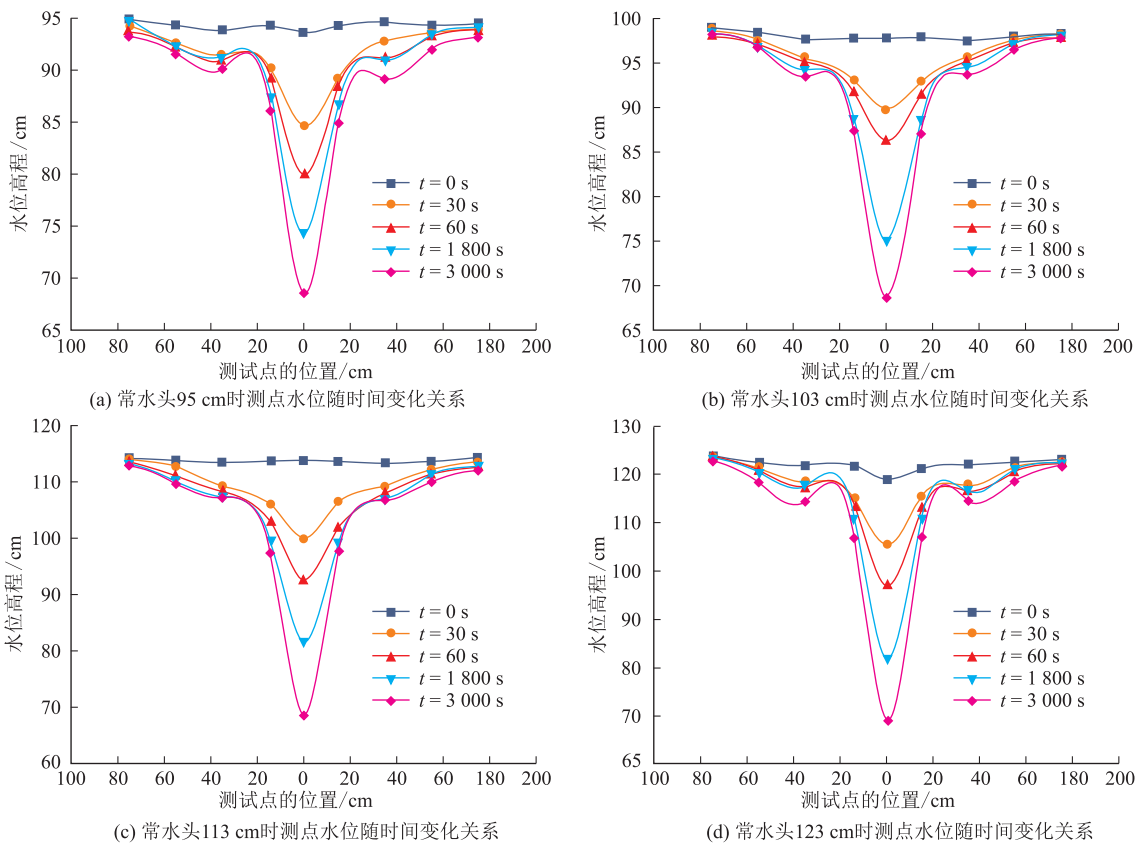


图 7 68 cm 高程处各点在某时刻水位高程连线

## 5 主要结论

本文依托莲峰隧道工程,基于自主设计的室内试验模型,研究了含水平裂隙岩体隧道开挖过程周围水位随时间变化规律,主要结论如下:

(1) 在打开水阀模拟隧道开挖前,模型内水位高程接近近似直线状态并保持稳定。当打开水阀时,隧道中出现涌水,隧道周边水位开始源源不断地

向隧道补给,周围水位下降且越靠近隧道轴线的测压管中水位下降越快。

(2) 同一高程上的各测点在同一时刻的水位高程用平滑曲线连接起来,呈现明显下凹的降落漏斗形式。这说明隧道开挖对地下水环境造成了影响,尤其隧道口附近。

(3) 当两侧水压存在梯度时,初始时刻水位的连线呈近似直线形,随着隧道开挖过程,左右水位均向隧道补给,形成不对称降落漏斗。低水位补给能

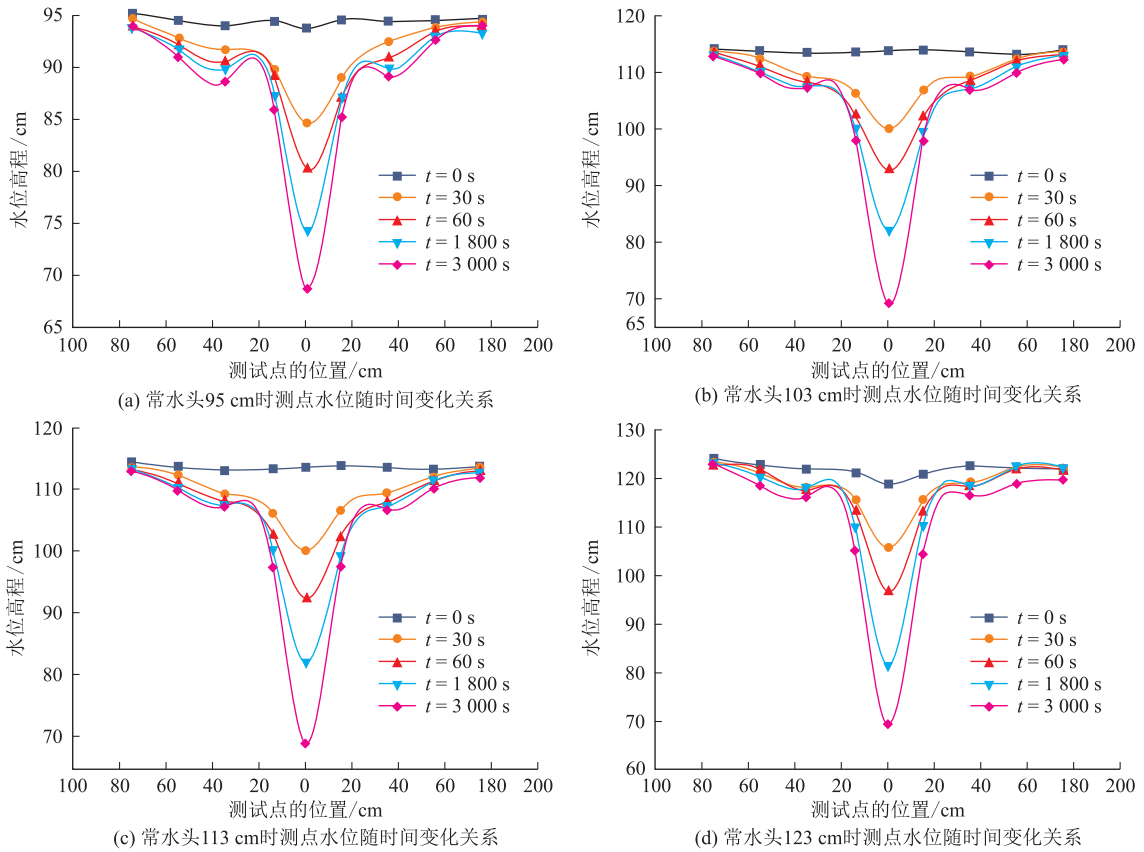


图8 73 cm 高程处各点在某时刻水位高程连线

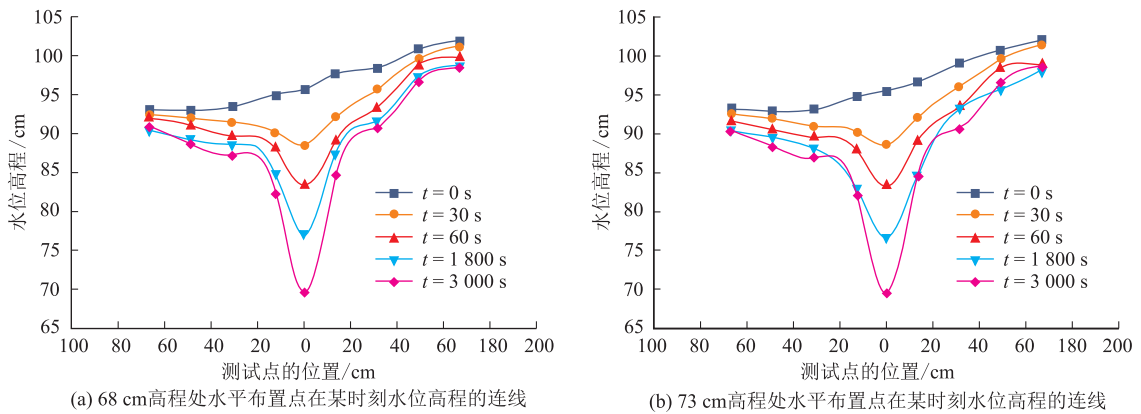


图9 梯度 0.05 时测点水位随时间变化关系

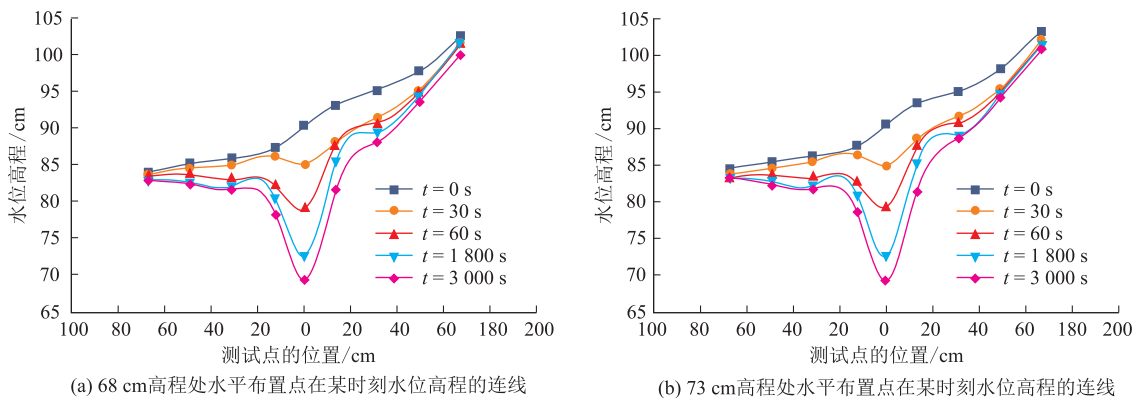


图10 梯度 0.1 时测点水位随时间变化关系

力弱,水位曲线下降趋势小;高水位补给能力强,曲线下降快。

#### 参考文献

- [1] 樊浩博,周定坤,刘勇,等.富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J].岩土力学,2022,43(7):1-15.
- [2] 曹林卫,黄明利,杨泽,等.隧道与溶洞间复合围岩抗水压力数值模拟[J].科学技术与工程,2022,22(8):3349-3357.
- [3] 房忠栋,杨为民,王旌,等.深埋隧道前方承压溶洞隔水岩体最小安全厚度研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2805-2816.
- [4] 肖前丰,李文龙,符文熹,等.富水构造区圆形隧道抗突体最小安全厚度解析解[J].工程科学与技术,2022,54(3):159-168.
- [5] 李利平,李术才,张庆松.岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J].岩土力学,2010,31(2):523-528.
- [6] 黄润秋.深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J].地质灾害与环境保护,1997,8(1):50-68.
- [7] 陶月赞,姚梅.地下水渗流力学的发展进程与动向[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):221-230.
- [8] 刘强,谭忠盛,王秀英.水下隧道渗流场分布规律的模型试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):388-392.
- [9] 袁金秀,刘炳华,高新强,等.高水压隧道衬砌背后水压力预测模型研究[J].铁道工程学报,2021,38(7):48-53.
- [10] 黄昕,谷冠思,张子新,等.考虑渗流的泥水平衡盾构隧道稳定性数值模拟[J].隧道与地下工程灾害防治,2022,4(2):28-38.
- [11] 刘丹,杨立中,于苏俊.华蓥山隧道排水的生态环境问题及效应[J].西南交通大学学报,2001,36(3):308-313.
- [12] 陈仲达,林志,陈相,等.基于非线性渗流模型的管道型岩溶隧道突水机理研究[J].现代隧道技术,2022,59(1):149-155.

**作者简介:** 刘文刚(1986—),男,高级工程师,陕西省宝鸡人,毕业于西安建筑科技大学,主要从事交通工程方面的科研与管理工作。

E-mail: 448411452@qq.com