

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0173

城市隧道动、静水头作用下的渗流模型试验

李 铮^{1,2}, 何 川², 杨赛舟², 杨文波²

(1. 重庆市城市建设投资(集团)有限公司, 重庆 400015; 2. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 依托毗邻深圳水库的深圳东部过境高速公路连接线工程, 研制了以控制渗透系数为核心的围岩-支护体系新型相似材料, 利用自制渗流模型试验系统, 研究不同高度的动、静作用水头对水压力、排水量及渗流场的影响。试验表明: 地下水位较高时, 注浆圈内壁经历块状润湿、浸润线状态、完全湿润、拱腰以上挂满水珠、间断性水流线等过程, 而随着作用水头的降低, 渗流速度减慢, 渗流时间大幅增加; 随着静水头高度降低, 各特征点水压力呈近似线性下降, 且作用水头越小, 相同位置二衬和注浆圈背后的水压力值更加接近, 而隧道排水量测试的离散性也越小; 动水头作用下, 水压力随时间变化有明显的滞后性, 其时间效应不利于结构稳定, 而动水头下降过程中浅埋处更易受到影响, 需加强隧道顶部的承载及抗渗设计, 隧道排水量值随动水头下降呈减小的趋势, 且降低相同水位差所需的时间越长。

关 键 词: 水库下游; 城市隧道; 渗流模型; 动、静水头; 水压力; 排水量

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1767-08

Seepage model experiments on urban tunnel influenced by dynamic and hydrostatic head

LI Zheng^{1,2}, HE Chuan², YANG Sai-zhou², YANG Wen-bo²

(1. Chongqing City Construction Investment(Group) Co., Ltd., Chongqing, 400015, China;

2. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031, China)

Abstract: A new type of similar material for the surrounding rock-support system was developed to control the permeability coefficient, based on the Shenzhen East Transit Expressway Link Project adjacent to Shenzhen reservoir. A self-made seepage model test device was used to analyse the effects of dynamic and hydrostatic heads with different heights on water pressure, water discharge and seepage field. The results showed that when the groundwater level was relatively high, the inner walls of grouting ring underwent several procedures such as heavy wetting, the occurrence of saturation line, thoroughly wetting, overhanging water drops above the arch and intermittent water flow. With the decrease of the water head, the seepage velocity slowed down and the seepage time increased greatly. The water pressure at each feature point reduced approximately linearly with decreasing the height of the hydrostatic head. Besides, when the hydrostatic head became lower, the water pressure values at the same position of secondary lining and grouting ring were closer, and the dispersion of tunnel water discharge test was also smaller. Under the action of the dynamic head, the water pressure presented an obvious time lag, and the time effect was not conducive to the stability of the structure. The shallow buried areas were more easily affected by the decrease of the dynamic head, which indicated that it was necessary to strengthen the capacity and anti-seepage design of the tunnel roof. The water discharge of the tunnel exhibited a decreased tendency with the decrease of the dynamic head, and it took a longer time to reduce the same water-head difference.

Keywords: downstream area of reservoir; urban tunnel; seepage model; dynamic and hydrostatic head; water pressure; water discharge

1 引 言

城市隧道由于使用功能的多样性和地理位置的特殊性, 存在以下显著特点: 受地形、城市规划用

地及既有构(建)筑物的限制, 隧道埋深通常较浅; 考虑城市交通量大, 为避免交通瓶颈现象, 多采用受力较差的扁平大断面结构, 导致设计和施工难度增加; 加之运营管理设施复杂、出入口通道较多、

收稿日期: 2016-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFC0802210); 国家自然科学基金青年基金(No. 51408494, No. 51678499); 四川省交通科技项目(No. 110109066)。This work was supported by the National Key R & D Plan(2016YFC0802210), the Young Foundation of the National Natural Science Foundation of China (51408494, 51678499) and the Traffic Science and Technology Project of Sichuan Province(110109066).

第一作者简介: 李铮, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程方面的管理和研究工作。E-mail: lizheng872@163.com

通讯作者: 杨文波, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: yangwenbo1179@hotmail.com

外观要求高等特点,大型地下互通立交应运而生,而矿山法依然是城市隧道的首选工法^[1-2]。

城市隧道工程在蓬勃发展的同时也面临着诸多问题,涉及到结构安全、地质条件、环境保护、通风照明等多个方面,由此可能导致在隧道施工及运营期间发生安全隐患,其中影响最为广泛的是地下水问题。隧道长期渗漏水,可能导致地下水大量流失、水位下降,还易造成衬砌变形、拱顶塌方,加速锚杆和拱架的腐蚀,侵蚀隧道内附属设施。为解决上述问题,首先要研究作用水头对隧道水压力-排水量之间关系的影响,从而分析隧道地下渗流场的演变过程。隧址区环境稳定时,运营期隧道长期处于静水头作用下,地下水补给、渗流及排泄达到动态平衡,隧道结构受力明确,其水压力与排水量关系恒定。但隧址区地下水环境改变时,如水库泄洪、局部强降雨或其他突发情况改变了地下水位,隧道将在一定时间内处于动水头作用下,此时,原有的渗流场平衡被打破,隧道水压力-排水量的关系随之改变,尤其针对埋深较浅的城市隧道,作用水头突变可能导致隧道主动限排量和蓄水池水量变化,对围岩-支护体系的影响也不可忽略。目前,国内外对动、静水头作用的研究多集中于桥墩、水库闸门等结构方面^[3-6],而对隧道工程中的动、静水头问题鲜有涉及。基于此,进行城市矿山法隧道在动、静水头作用下的渗流模型试验,研究其水压力分布规律并预测排水量有切实的工程意义。

采用隧道渗流模型试验方法能够真实、直观地反映工程实际情况,是研究地下渗流场演变、水压力对隧道结构的影响以及预测隧道排(涌)水量的一种重要手段^[7]。本文以毗邻深圳水库的深圳东部过境高速公路连接线工程为依托,利用自主研发的大型施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统,研究不同高度的动、静水头作用对隧道水压力、排水量及渗流场的影响,其成果对类似工程的设计和施工具有一定的指导作用。

2 工程概况

深圳水库在深圳河上取山形狭峙处拦河筑坝而成,总库容为 $4.496 \times 10^7 \text{ m}^3$,常年蓄水,是东深供水工程向深圳、香港供水的生命线。深圳东部过境高速公路连接线工程是由南、北主线及匝道组成的大型地下互通立交,双线并列布置,地处深圳水库下游敏感地带,隧道底板远低于水库蓄水位,北线最近处距离水库大坝仅 260 m。隧址区水文地质条件复杂,隧道沿线地形起伏较大,以IV~VI级围岩为主,裂隙发育,地下水补给丰富,围岩性质上、下差异较大。本工程主线大断面隧道施工将显著改变水库周边水文地质边界,尤其还有多条断层带与工程线路大角度相交且向水库方向延伸(见图1),隧道穿越断层破碎带时可能发生突水、突泥^[8],其工程规模和设计施工难度均属国内在建隧道之首,可供借鉴的工程实例较少。

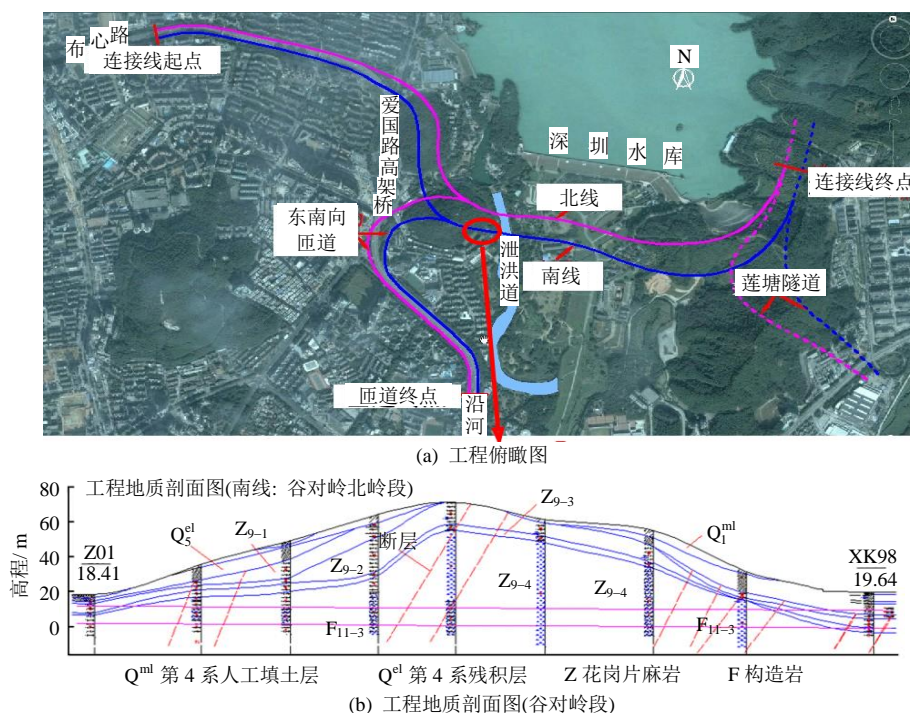


图1 隧址区地形地貌

Fig.1 Landform and physiognomy of tunnel area

本次试验模拟北线隧道谷对岭地区至水库下游过渡段(BXK1+275~BXK1+550)附近渗流状态,隧道整体位于地下水位之下并下穿泄洪渠。该区段隧道平均埋深约38 m,地下水头为17.0~33.5 m,通过地质钻探、钻孔声波测井、现场抽水试验等综合分析,岩体多具有碎裂、碎斑结构,以中风化变质砂岩和碎裂岩为主,不均匀分布有角砾岩和糜棱岩,闭合裂隙发育,绿泥石化现象显著。围岩渗透性较强,测试渗透系数为0.12~0.20 m/d,拱顶砂层透水性强,结构松散,施工中易发生坍塌、涌水、涌砂等工程问题,可能影响泄洪通道的顺畅排洪。设计隧道为三车道,加固圈厚度为4.5 m,马蹄形断面内轮廓宽为14.2 m,高为9.8 m。

3 动、静水头作用下的渗流模型试验

试验首先研制了与工程现场相符的围岩-支护体系相似材料,并采用施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统,通过调节不同高度的隧道动、静作用水头,探索隧道渗流场演变过程,研究运营期隧道水压力分布规律及排水量变化情况,其成果已成功应用于深圳东部过境高速公路连接线工程中。

3.1 相似材料的研制

模型试验研究核心是以地下水渗流理论为出发点的隧道渗流及防排水问题,其水压力和排水量值主要与隧道洞径、作用水头、渗流影响半径以及围岩-支护体系的渗透系数等参数相关,而与围岩、注浆圈、初衬等材料的物理力学特性关联不大^[9-10]。故以控制相似材料渗透系数为综合指标,根据相似第二定理,采用量纲分析法确定材料相似比为^[11-12]:几何相似比 $C_L = 1/30$,渗透系数相似比 $C_K = 1$,重度相似比 $C_\gamma = 1$,水头高度相似比 $C_H = 1/30$,时间相似比 $C_t = 1/30$,水压力相似比 $C_p = 1/30$,排水量相似比 $C_Q = 1/900$ 。模型中隧道洞径宽为430 mm,高为330 mm,距边壁均约4倍洞径以消除渗流边界影响。

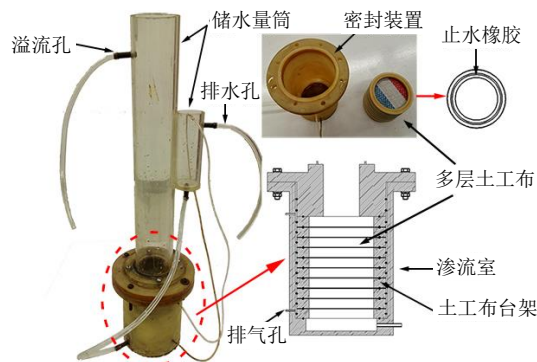
围岩-支护体系相似材料的研制在参考前人研究成果的基础上^[13-14],结合工程现场测试的材料参数,利用自制恒水头渗透仪、多层编织土工布渗透系数试验装置等专用设备(见图2),通过大量配比试验,确定了适用于矿山法隧道渗流试验的围岩、注浆圈、初衬等新型相似材料及其原料配比,如表1所示。

3.2 模型试验装置

施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统主要包括渗流模型箱、加固区模拟装置、反滤层、移



(a) 恒水头渗透仪



(b) 多层编织土工布渗透系数试验装置

图2 渗透系数测试设备

Fig.2 Equipment for testing penetration coefficient

表1 模型试验相似材料配比
Table 1 Similar material ratio of model test

隧道结构	实际渗透系数 / (m/d)	备注
围岩	0.178	黏土:细砂:玻璃纤维=1.00:1.60:0.01
注浆圈	0.025	水泥:炭渣=1:12, 厚度为150.0 mm
初衬	8.640×10^{-3}	8层编织土工布, 厚度为5.9 mm
二衬	不透水	1.0:1.3的特种石膏(内设钢筋网)+3.0 mm防水清漆

注:所用黏土粒径小于等于0.075 mm, 细砂粒径小于等于0.3 mm, 炭渣粒径小于等于2.0 mm。

动式循环水箱装置和数据采集装置,整体尺寸为3 m×3 m×2 m(宽×高×厚),如图3所示。

由黏土、细砂和玻璃纤维配制的围岩相似材料分层铺设于渗流模型箱中,加固区模拟装置通过双层法兰盘连接在渗流模型箱洞口处,初衬、二衬等隧道结构依次安置于模型箱内。注浆圈采用专用模具预制,并分块连接填满加固区模拟装置,其外敷无纺布和塑料网组成的反滤层以形成稳定试验工作区。移动式循环水箱装置为试验提供作用水头,水压力测试系统、排(涌)水量采集装置等可有效采集数据,由上述装置可形成一套功能完善的矿山法隧道渗流系统。

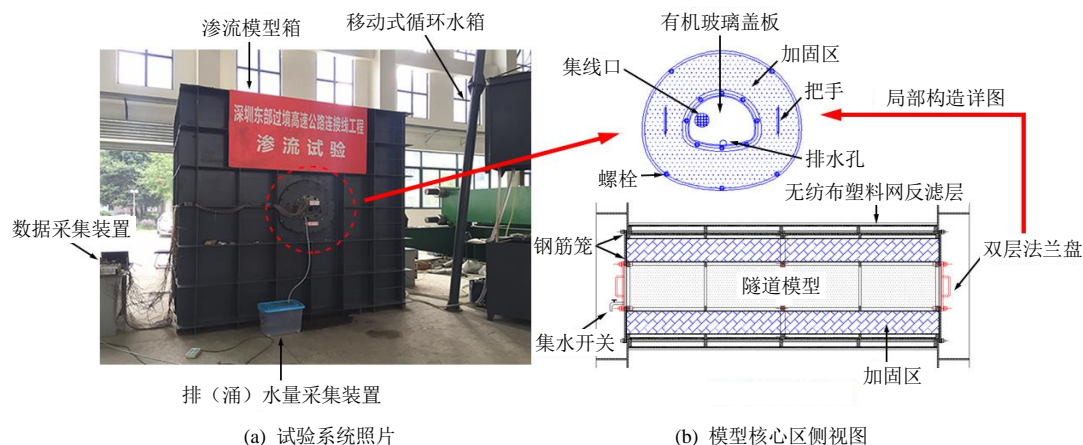


图3 矿山隧道渗流模型试验系统
Fig.3 Seepage model test system for mine tunnel

3.3 试验工况

本次试验研究城市隧道运营期,动、静水头作用对水压力-排水量的影响及隧道渗流场的演变过程,动水头和静水头的模拟依靠调节移动式循环水箱装置实现(见图4)。移动式循环水箱装置包括放置于地面的升降式水箱架、上部移动式水箱、下部固定式水箱和置于固定式水箱内的潜水泵,潜水泵用软管连接移动式水箱底端,移动式水箱上侧的溢流孔将溢出水引回固定式水箱中形成循环系统。移动式水箱可利用手拉葫芦进行升降,其底部出水孔有软管与渗流模型箱底部进水孔连接,向模型提供作用水头,水头值可由上部移动式水箱表面安设的水位计读取。

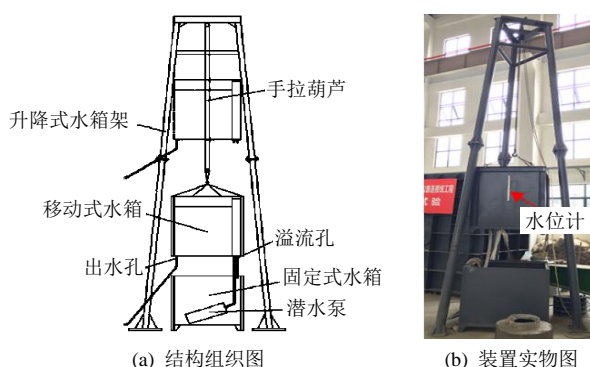


图4 移动式水箱循环装置
Fig.4 Mobile water tank circulating device

开启潜水泵,将水从固定式水箱内引入移动式水箱形成循环并保持稳定时,模拟隧道静水头作用。根据工程实际水头高度,本试验拟分别采用 20、25、30 m 三种静水头进行研究,即试验水头分别为 0.67、0.83、1.00 m。试验过程中,数据采集装置显示的隧道水压力和排水量值稳定后,关闭潜水泵,

停止地下水补给,依靠隧道自身排泄能力使作用水头随时间自然下降,模拟隧道动水头作用,其初始水头与静水头试验值相同。

3.4 测点布置

测试水压力值采用 60 个测点静态应变测试分析系统(TST3826F)搭配孔隙水压力传感器(水压力计)。经过选型,最终使用采集频率高、信号稳定、抗干扰能力强的 TST 型孔隙水压力传感器,其量程为 30 kPa,精度为 0.1 kPa。水压力测点分别布置在模型试验箱中部二衬及注浆圈外侧的拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底 5 个特征部位,如图 5 所示。

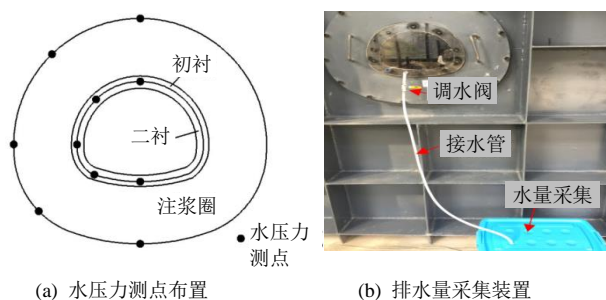


图5 测点布置及测量装置
Fig.5 Measuring point arrangements and measuring device

利用接水管连接带刻度的水箱进行隧道排水量采集,并由导管将隧道拱顶位置(初衬与二衬之间)的地下水通过设置在渗流模型箱两端双层法兰盘上的排水孔引出。此外,接水管上设有调水阀,可主动控制排水量,实现限量排放的模拟。

3.5 试验流程

(1) 首先在渗流模型箱中分层铺设围岩相似材料,并用环刀取样,检测其渗透系数是否满足试验

要求, 为提高渗流场的均匀性和渗流速率, 将一层 50 mm 厚碎石层铺设在渗流模型箱边壁(图 6(a))。

(2) 开启渗流模型箱两端双层法兰盘, 依次安置预制的注浆圈、初衬、二衬等结构以模拟运营期隧道构造, 并采用高标号水泥浆液封堵注浆圈环向接缝使地下水稳定渗流, 在注浆圈外侧设有塑料网和无纺布组成的反滤层(图 6(b))。

(3) 将水压力计安置在预定特征点位并连接静态应变测试分析系统, 该系统的接地线埋入土中以消除外界环境干扰, 保证水压力测量值的可靠性, 渗流试验前校准并调零水压(图 6(c)、6(d))。

(4) 关闭双层法兰盘和渗流模型箱顶盖, 在模型箱出线口涂抹防水密封胶, 调节移动式循环水箱装置以保证稳定的试验水头, 模拟静水头作用效果(图 6(e))。

(5) 待隧道水压力-排水量稳定后读取数值, 并关闭潜水泵向上部水箱的补给, 使作用水头随时间下降。此时, 隧道渗流排泄为地下水唯一流出途径, 可有效模拟动水头作用效果, 实时动态监测水头、各特征点水压力及排水量变化(图 6(f))。

(6) 改变初始水头高度再次进行试验, 渗流稳定前可取出初衬和二衬结构, 从预留观察孔中置入高清摄像头记录隧道渗流演变过程。

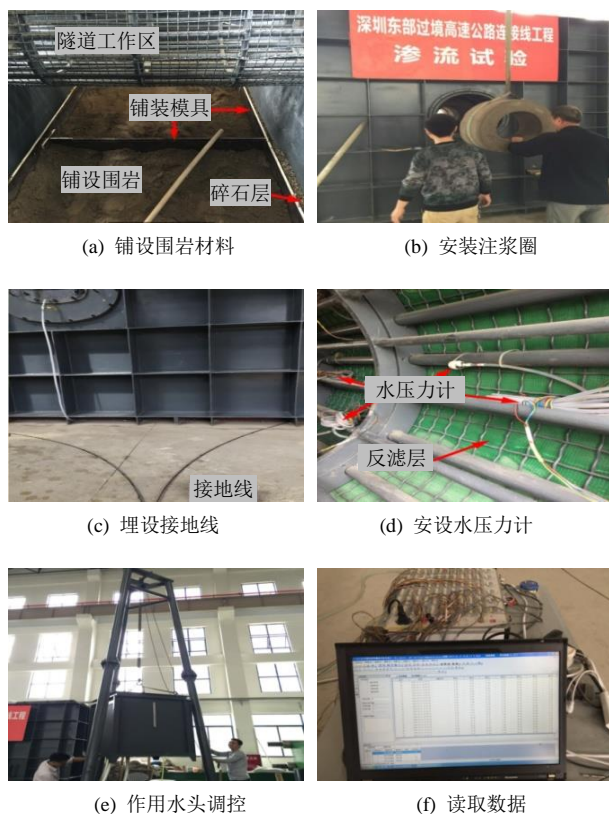


图6 试验过程照片

Fig.6 Photos in the testing process

4 模型试验结果分析

4.1 不同高度水头作用下隧道渗流场演变

由地下水渗流理论、二维稳态流动的复变函数理论等可知^[15-16], 地下水头作用对隧道渗流场演变起主要作用, 本次试验分别以 20、25、30 m 作用水头为初始水头, 采用从双层法兰盘观察孔中置入的高清摄像头, 观察渗流稳定前注浆圈内壁的水流浸润过程, 并记录其从干燥到饱和状态的渗流时间。本文仅列出 30 m 作用水头时的渗流演变过程, 如图 7 所示。



图7 渗流演变过程(30 m 水头)

Fig.7 Seepage evolution process (with 30 m head)

从注浆圈内壁渗流演变过程可知, 不同高度的作用水头, 其渗流过程并不相同。模拟 30 m 作用水头时, 注浆圈内壁渗流演变过程较为明显, 渗流 20 h 后, 出现少量的块状润湿面, 主要位于拱顶和拱底位置, 表明模型箱中的围岩已接近饱和状态, 地下水开始通过注浆圈向隧道内排泄; 渗流 27 h 后, 注浆圈内侧润湿面积加大, 拱底已基本浸透, 拱顶出现明显的浸润线, 而拱肩至拱腰处也有润湿的趋势; 渗流 36 h 后, 注浆圈内壁均已湿润, 表明注浆圈已接近饱和, 拱顶处出现少量水珠; 渗流 49 h 后, 拱腰以上位置挂满水珠, 且部分水珠开始滴落, 拱底有少量积水; 渗流 64 h 后, 水珠滴落速度加快,

局部可见间断性水流线, 拱底积水明显增加。

当模拟的初始作用水头降低为 25 m 和 20 m 时, 注浆圈内壁处于块状润湿和浸润线状态的时间大幅延长, 注浆圈饱和后仅拱顶处可见少量水珠, 渗流过程中未见明显线状水。25 m 作用水头时, 31 h 后出现块状润湿, 60 h 后拱顶水珠滴落; 而 20 m 作用水头时, 约 80 h 拱顶可见少量水珠。可见, 随着地下水位降低, 渗流速度减慢, 渗流时间大幅增加, 隧道渗流场演变状态是不同的。

4.2 静水头作用下隧道水压力-排水量分析

试验分别模拟 20、25、30 m 静水头作用下, 控制调水阀 (接近最小排水量), 保持接水软管过水面积恒定, 待隧道水压力-排水量稳定后开始测量, 二衬及注浆圈外各特征点水压力分布规律如图 8(a)所示, 不同高度静水头作用下的排水量结果如图 8(b)所示。

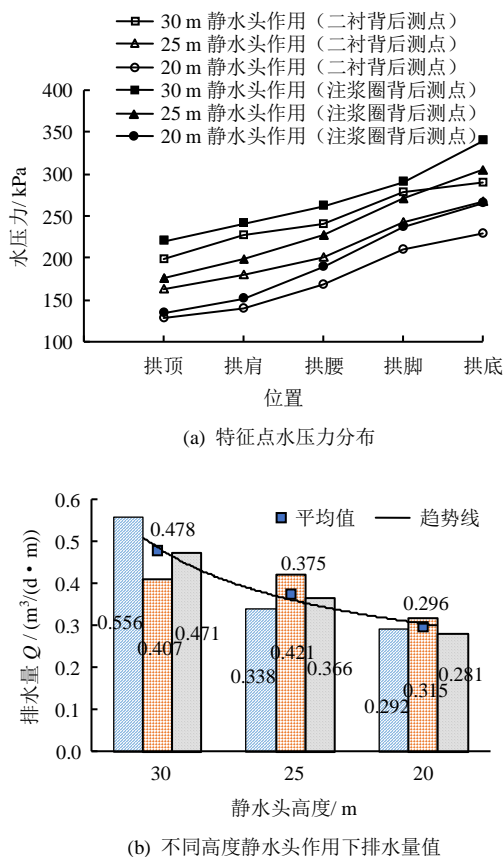


图 8 静水头作用下隧道排水量-水压力测试结果

Fig.8 Testing results of tunnel water discharge and water pressure under hydrostatic head

由图 8(a)可知, 不同高度的静水头作用下, 各特征点水压力分布规律变化明显。二衬及注浆圈背后各测点的水压力变化规律基本一致, 均表现为由拱顶至拱底逐渐增大的趋势, 且在相同水头作用下,

隧道同一位置注浆圈背后水压力较二衬背后更大, 说明注浆圈具有一定的阻水性。静水头高度降低时, 各特征点水压力呈近似线性下降, 表明隧道各特征部位对水头变化的响应具有敏感性和一致性, 且作用水头越小, 相同位置二衬和注浆圈背后的水压力值越接近。20 m 静水头作用下, 二衬背后拱顶处水压力值为 129.3 kPa, 注浆圈背后水压力值为 134.6 kPa。

对于不同高度静水头作用下的排水量, 随静水头高度降低, 其值呈逐渐下降的趋势, 30、25、20 m 静水头分别对应 0.478、0.375、0.296 $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 的隧道排水量 (图 8(b)), 且通过多次试验发现, 静水头高度越低, 排水量测试的离散性越小, 表明低水位作用时, 隧道排水率更加稳定。

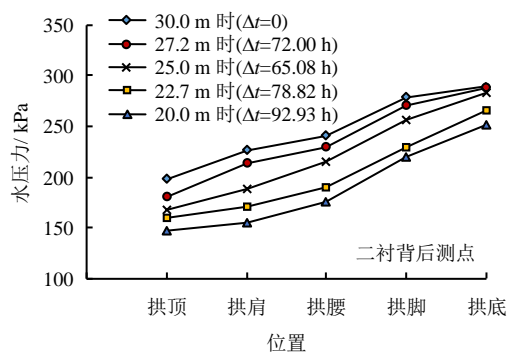
4.3 动水头作用下隧道水压力-排水量分析

试验分别模拟 20、25、30 m 静水头为初始作用水头时, 待隧道水压力-排水量稳定后, 在其他条件不变的情况下停止水头补给, 依靠地下水位随时间的自然下降过程以达到动水头模拟效果, 并进行实时监测。以 30 m 初始作用水头为例进行分析 (试验结果表明, 不同初始动水头作用时的规律性基本吻合), 二衬外各特征点水压力随时间分布规律如图 9(a)所示, 注浆圈外各特征点水压力随时间分布规律如图 9(b)所示, 隧道实时排水量值如图 9(c)所示。

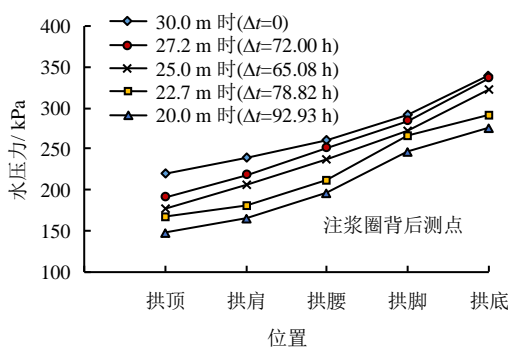
由图 9(a)、9(b)可知, 地下水位随时间下降到的高度与同高度静水头作用时相比, 各特征点水压力值均偏大, 水头降至 20 m 时, 二衬背后拱顶处水压力值为 147.9 kPa, 注浆圈背后水压力值为 148.2 kPa, 表明动水头作用下, 水压力随时间变化具有明显的滞后性, 而根据饱和-非饱和渗流控制方程, 当水位上升速率较快时, 地下水响应同样滞后, 并引起动水压增大^[17], 可见动水头的时间效应不利于结构的稳定。在地下水位下降过程中, 拱顶位置特征点水压变化最快, 而拱底位置变化幅度较小, 表明浅埋处更易受动水头影响, 工程中不能忽视隧道顶部的承载及抗渗设计。注浆圈背后与二衬背后水压力减小幅度基本相同, 表明注浆圈在动水头作用下并没有明显的分担水压作用。

由图 9(c)可知, 作用水头随时间下降时, 隧道排水量值呈减小趋势, 降至 20 m 时为 0.339 $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$, 但仍大于同高度下静水头的排水量 (0.296 $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$), 且降低相同水位差所需的时间越长。可见, 相对于静水头作用, 动水头会改变隧道实时排水量, 破坏隧道水压力-排水量之间的动态平衡, 进而影响结构

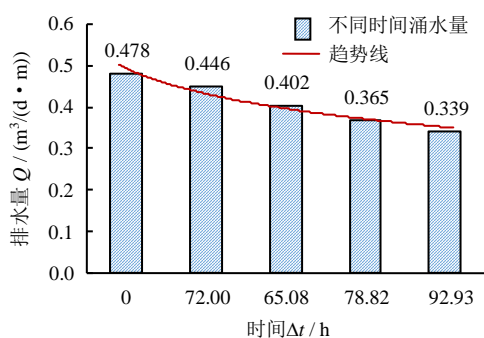
稳定性, 可采取必要的主动调控排水率措施缓解该影响。



(a) 特征点水压力分布 (二衬背后)



(b) 特征点水压力分布 (注浆圈背后)



(c) 动水头隧道排水量值

图9 动水头作用下隧道排水量-水压力测试结果

Fig.9 Testing results of tunnel water discharge and water pressure under dynamic head

5 结 论

(1) 研制了以控制渗透系数为核心的围岩-支护体系新型相似材料, 利用施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统, 研究不同高度的动、静水头作用对水压力、排水量及渗流场的影响。

(2) 地下水位较高时, 注浆圈内壁经历块状润湿、浸润线状态、完全湿润、拱腰以上挂满水珠、间断性水流线等过程, 而随着作用水头降低, 渗流速度减慢, 渗流时间大幅增加。

(3) 随着静水头高度降低, 各特征点水压力呈近似线性下降, 且作用水头越小, 相同位置二衬和注浆圈背后的水压力值更加接近, 而隧道排水量测试的离散性也越小。

(4) 动水头作用下, 水压力随时间变化有明显的滞后性, 其时间效应不利于结构稳定, 而动水头下降过程中浅埋处更易受到影响, 需加强隧道顶部的承载及抗渗设计, 隧道排水量值随动水头下降呈减小的趋势, 且降低相同水位差所需的时间越长。

参 考 文 献

- [1] HE C, WANG B. Research progress and development trends of highway tunnels in China[J]. **Journal of Modern Transportation**, 2013, 21(4): 209—223.
- [2] 李铮, 何川, 丁建军, 等. 矿山法城市隧道运营期排水量与水压力关系的一种预判方法[J]. **工程力学**, 2017, 34(1): 14—21.
LI Zheng, HE Chuan, DING Jian-jun, et al. A method to predict the relationship between water discharge and pressure during operational period of city tunnels constructed using the mining method[J]. **Engineering Mechanics**, 2017, 34(1): 14—21.
- [3] 黄信, 李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J]. **土木工程学报**, 2011, 44(1): 65—73.
HUANG Xin, LI Zhong-xian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic response of bridge piers in deep water[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(1): 65—73.
- [4] 李昊, 张园, 文恒. 水力自动滚筒闸门振动特性的数值模拟及试验研究[J]. **水利学报**, 2015, 46(11): 1360—1370.
LI Hao, ZHANG Yuan, WEN Heng. Experimental research and numerical simulation on vibration characteristic of hydraulic automatic drum gate[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2015, 46(11): 1360—1370.
- [5] 高新强, 仇文革. 深埋单线铁路隧道衬砌高水压分界值研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(10): 1675—1680.
GAO Xin-qiang, QIU Wen-ge. Research on the boundary value of high hydraulic pressure upon lining in deep-lying single-track railway tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1675—1680.
- [6] 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研

- 究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 346—357.
- XIANG Ke, ZHOU Shun-hua, ZHAN Chao. Model test study of buoyancy on shallow underground structure[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2010, 38(3): 346—357.
- [7] 黄震, 姜振泉, 孙晓倩, 等. 深部岩体在高压水头作用下的渗透性状况试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 651—657.
- HUANG Zhen, JIANG Zhen-quan, SUN Xiao-qian, et al. Experimental examination of permeability of deep rock mass under high water pressure[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2015, 32(4): 651—657.
- [8] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 断层破碎带隧道突水突泥灾变演化模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2851—2860.
- WANG De-ming, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2851—2860.
- [9] 王秀英, 王梦恕, 张弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压力的简化方法[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 8—10.
- WANG Xiu-ying, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. A simple method to calculate tunnel discharge and external water pressure on lining[J]. **Journal of Northern Jiaotong University**, 2004, 28(1): 8—10.
- [10] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 5—10.
- WANG Jian-yu. Once more on hydraulic pressure upon lining[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2003, 40(3): 5—10.
- [11] 何川, 李铮, 杨赛舟, 等. 施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统的研制及应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 114—130.
- HE Chuan, LI Zheng, YANG Sai-zhou. Development and application on mined tunnel seepage model test system for construction and operation period[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2017, 30(5): 114—130.
- [12] 谭忠盛, 曾超, 李健, 等. 海底隧道支护结构受力特征的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 99—105.
- TAN Zhong-sheng, ZENG Chao, LI Jian, et al. Model test investigation on the mechanical characteristics of support structure of subsea tunnels[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(11): 99—105.
- [13] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128—1137.
- LI Shu-cai, ZHOU Yi, LI Li-ping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1128—1137.
- [14] HYUK SANGJUNG, YUN SUHAN, SUNG RAECHUNG, et al. Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 38(3): 476—486.
- [15] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压力问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 1—4.
- ZHANG You-tian. Discussion on external hydraulic pressure upon rock tunnel lining[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2003, 40(3): 1—4.
- [16] KOLYMBAS DIMITRIOS, WAGNER PETER. Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22(1): 23—27.
- [17] 柳群义, 朱自强, 何现启, 等. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 85—89.
- LIU Qun-yi, ZHU Zi-qiang, HE Xian-qi, et al. Unsaturated seepage analysis of the influence of water level fluctuation on pore water pressure of landslide in reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Sup.1): 85—89.