

DOI: 10.11779/CJGE202104014

排水管堵塞引起的高铁隧道结构变形与 渗流场特征模拟试验研究

李林毅, 阳军生*, 高 超, 王树英, 王子建, 相懋龙

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 基于 3D 打印技术构建了高铁隧道结构及排水系统设施精细模型, 提出了切实可行的隧道堵管模拟方法及模拟装置, 依托典型病害案例开展了堵管病害相似模型模拟试验, 探讨了在不同堵管条件、不同地层水头下隧道渗流场(隧道排水量、结构外水压力)及结构位移量的变化规律特征。研究结果表明: 随堵塞程度加深, 隧道排水量呈现先慢后快型下降趋势, 具体为排水管堵塞率为 50%前隧道排水量下降幅度较小, 而堵塞率达 50%后隧道排水量骤减直至不排水; 底部结构隆起位移存在“隧底>内轨>外轨”的量值关系, 且随堵塞程度加深隆起位移呈现先慢后快型增长趋势; 受排水减少影响, 堵管后结构外水压力逐步由“隧底最大, 拱顶、拱腰次之, 墙脚最小”的扇贝型分布转为“静水压”型分布; 至全堵条件下地层水头 40 m 时试验位移结果与现场病害特征吻合良好, 验证了上述模拟方法的可行性与有效性。研究成果以期富水隧道堵管防治及类似病害评价提供借鉴与指导作用。

关键词: 排水管堵塞; 高铁隧道; 仰拱隆起; 渗流场; 模拟试验; 3D 打印技术

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)04-0715-10

作者简介: 李林毅(1994—), 男, 湖南郴州人, 博士研究生。从事隧道工程防排水体系研究工作。E-mail: tunnel_lly@csu.edu.cn。

Simulation tests on structural deformation and seepage field of high-speed railway tunnels under drainage clogging

LI Lin-yi, YANG Jun-sheng, GAO Chao, WANG Shu-ying, WANG Zi-jian, XIANG Mao-long

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on 3D printing technology, a fine model for high-speed railway tunnel structure and drainage facilities is constructed, and a feasible simulation method for drainage clogging is put forward. Based on a typical disease case, a simulation test on drainage clogging is carried out, and under different conditions of drainage clogging and groundwater level, the seepage field (including drainage volume and external water pressure) and structural deformation are discussed. The results show that with the deepening of blockage, the drainage volume shows a slow downward trend and then a fast downward trend, and specifically, when the drainage pipe blockage is less than 50%, the tunnel drainage decreases slightly, and when the blockage is more than 50%, the tunnel drainage decreases sharply until no drainage occurs. The displacement of bottom structure uplift has the quantitative relation of "tunnel bottom > inner rail > outer rail", and with the increase of blockage degree, the uplift displacement slowly grows first and then fast grows. Affected by the reduction of drainage, the external water pressure of the structure gradually changes from "the maximum at the bottom, next at the crown and waist of the arch, and minimum at the foot of the wall" to the "hydrostatic pressure" distribution. The test results of displacement coincide well with the characteristics of field defects when the water head is 40 m and the drainage pipe is fully blocked, which verifies the feasibility and validity of the proposed simulation method. The research results may provide reference and guidance for prevention of pipe plugging and evaluation of similar defects of water-rich tunnels.

Key words: drainage clogging; high-speed railway tunnel; invert heave; seepage field; simulation test; 3D printing technology

0 引 言

随着国家经济飞速发展, 为满足人们日益增长的出行需求, 以铁路隧道为代表的基础设施项目迅速增

基金项目: 高铁联合基金项目(U1934211); 国家自然科学基金项目(51878669); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2018A03003); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(2019zzts291)

收稿日期: 2020-03-27

*通信作者(E-mail: jsyang@csu.edu.cn)

加。隧道运营情况表明^[1-2],在富水地层中(尤其是岩溶地区)因地下水裹挟泥砂或地下水所含钙镁离子发生结晶反应等原因,致使排水系统常出现堵塞现象。铁路隧道通常采用以排为主或排堵结合的防排水设计^[3],一旦排水系统出现堵塞,降压能力将大大削弱^[4],易导致隧道外水压力突增^[5-6],进而引发结构渗漏水、仰拱隆起、衬砌裂损掉块等病害^[7-10]。鉴于上述问题的危害性,学者从工程实例、现场试验、数值仿真、理论解析等多方面对堵管问题的病害成因、不利影响进行了研究,蒋雅君等^[2,4]通过数个工程实例的调研,从化学因素、工程因素探讨了堵管问题的成因与机理;Chen等^[11]统计了以法国为主的十余座结晶堵管铁路隧道案例,证明了地质条件对于隧道结晶形成的关键作用,定义了隧道钙化程度判定指标;刘坤等^[1]依托中梁山某隧道,开展了排水系统非对称堵塞现场试验,探究了堵塞条件对结构外水压力的影响规律;高春君等^[5]通过“以板代孔”法对堵管问题进行了模拟,探究了不同堵塞及水位条件下的衬砌应力变化规律;刘新荣等^[12]针对隧道排水系统非对称堵塞问题,通过保角变换、坐标变换等解析方法,获得了该问题的渗流场解析级数,并探讨了相关参数影响。以上研究成果经工程实践验证,可为类似病害提供一定指导。

然而,值得注意的是:从工程实例出发的研究,现场工况较为单一,难以获得系统化病害规律;从现场试验入手的研究,由于地下水条件无法获知,难以明确其与隧道结构的影响关系,且对堵管程度、外水压力分布、结构位移均未深入探讨;从数值仿真入手的研究,如何确保其计算模型、参数取值与现场情况的匹配成为了需进一步考虑的难题;从理论解析出发的研究,解析模型较为简化且存在多种假设,难以直接应用于实际工程。此外,还需注意的是,既有研究大多仅对堵管影响下结构安全性予以考虑,而忽视了隧道运营需求。尤其对于高铁隧道,因运行时速快、控制标准高^[13],其轨道形位异常的出现已同步于甚至优先于结构裂损问题^[14],因此在其堵管问题影响分析中还应对轨道位移特征予以充分考虑。鉴于此,本文结合沪昆高铁麻拉寨隧道案例,基于3D打印技术构建高铁隧道精细化结构模型及附属设施,依据相似理论开展相似模型渗流试验,探讨在不同堵管条件、不同地层水头下隧道渗流场及结构位移量的规律特征,明确上述因素之间的影响关系。研究成果以期富水隧道堵管防治及其病害评价提供借鉴与指导作用。

1 背景工程及病害情况

1.1 工程概况及现场病害情况

沪昆高铁麻拉寨隧道为双线隧道,位于贵州省麻江县,全长2640 m,最大埋深约200 m。隧址区降雨丰富,年均降雨量近1400 mm,其中夏季降雨占比超过40%,地表多处分布岩溶洼地及落水洞,地下水补给条件良好。隧道洞身穿越地层地质条件较差,累计穿越4条断层带,洞身围岩以灰岩、白云岩为主,岩体较为破碎,岩溶特征发育。

隧道开通运营后,于2015年6月17日,隧址区历经强降雨,10 h降雨量达164.7 mm^[15],单小时降雨强度超过历史极值,导致部分区段发生仰拱隆起变形,途径列车出现严重晃车现象。经现场巡检^[16],发现正常段落排水畅通、流量较大且清澈(图1(a));而轨道异常段落排水量小,推测排水系统堵塞。经紧急泄压后泄水孔涌水明显,且水质浑浊(图1(b))。病害发生后,相关部门立即中断行车,随即进行轨道变形检测。检测结果显示^[16],轨道形位异常段落主要发生于K1695+250—+350,其中轨道高程偏差与水平偏差最大值分别为28.0 mm(隆起)、14.3 mm(远离中心线方向),上述最值均位于K1695+310断面。基于现场病害情况的研判,地层水连通性强、突发性强降雨、排水系统堵塞失效是病害发生的主要原因,而上述因素导致的隧道外水压力过高是病害发生的直接原因。

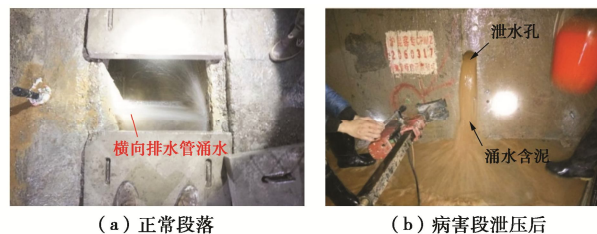


图1 病害时隧道排水情况

Fig. 1 Drainage conditions during defects occurrence

1.2 病害段隧道支护及排水体系设计

依据设计文件^[17],病害段采用的支护结构型式以Vc级复合式衬砌(图2)为主,其开挖面积为154.61 m²,开挖高度×跨度=12.64 m×14.96 m,具体支护参数如下:①初期支护:拱墙部位打设有 $\phi 25$ mm中空锚杆,长4 m,间距1.0 m×1.0 m(环×纵);28 cm厚的C30钢纤维混凝土;纵向间距60 cm的I22a工字钢。②二次衬砌:55 cm、65 cm厚(拱墙、仰拱)C35钢筋混凝土,环向钢筋配筋 $\phi 25@200$ mm。③仰拱填充:C20素混凝土。④轨道形式:CRTS I型双块式轨道结构。

该隧道采用铁路隧道常用的半包式防排水设计(图3),即拱墙衬砌与初支之间设有防水板与无纺布,围岩渗水经无纺布渗入,沿环向排水管、纵向排

水管汇聚流至边墙部位, 再经横向连接管流入隧道侧沟, 最后通过侧沟与中心水沟共同排导将地下水排出隧道。依据设计文件^[17]及施工台帐, 病害段具体布设参数如下: ①环向排水管: 采用 $\Phi 100\text{ mm}$ 打孔波纹管, 在拱墙部位沿环向布设, 因病害段处于富水段落, 布设间距为每隔 5 m 设置一环。②纵向排水管: 采用 $\Phi 150\text{ mm}$ 打孔波纹管, 设置于边墙初支与二衬之间, 左右侧各一根。③横向排水管: 采用 $\Phi 100\text{ mm}$ 波纹管, 埋设于隧道结构内, 布设间距为沿纵向每隔 20 m 布设一处。

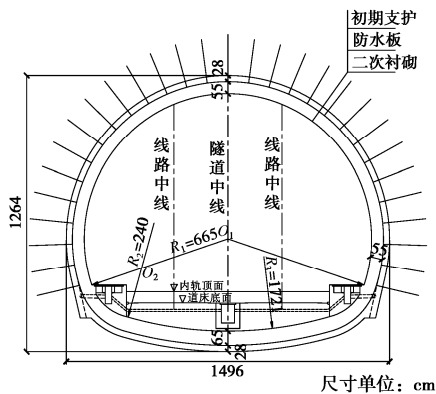


图 2 Vc 级围岩支护结构断面图^[17]

Fig. 2 Section diagram of Vc-grade support structure^[17]

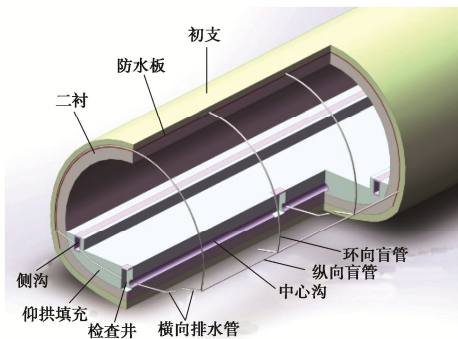


图 3 国内铁路隧道常用防排水体系^[18]

Fig. 3 Common waterproof and drainage systems for railway tunnels in China^[18]

2 相似模型试验研究

2.1 试验相似原理及相似材料选定

(1) 试验相似原理

本模型试验模拟的核心内容是在堵管条件下水压
力引发的隧道结构变形致灾问题, 故围岩材料、隧道
结构材料均应满足相关相似比例。试验以相似第二定
理为基本准则, 参考类似模型试验研究成果^[19-20], 结
合试验可行性、经济性等因素, 选取几何相似比 $C_L =$
 $1:40$ 、重度相似比 $C_\gamma = 1:1$ 、渗透系数相似比 $C_k =$
 $1:1$ 为基础相似比, 并采用量纲分析法确定其他试验

参数相似比, 具体取值如表 1 所示。

表 1 模型试验主要相似关系

Table 1 Similar relationships in model tests			
相似比	计算公式	量值	
基础相似比	几何相似比	$C_L = L_m / L_p$	1 : 40
	重度相似比	$C_\gamma = L_m / L_p$	1 : 1
	渗透系数相似比	$C_k = L_m / L_p$	1 : 1
渗流参数	地层水头相似比	$C_H = C_L$	1 : 1
	渗透时间相似比	$C_T = C_H / C_k$	1 : 40
	水压力相似比	$C_P = C_\gamma \cdot C_H$	1 : 40
	渗流量相似比	$C_Q = C_H^3 / C_T$	1 : 1600
变形参数	弹性模量相似比	$C_E = C_\gamma \cdot C_L$	1 : 40

(2) 围岩相似材料

本试验主要分析堵管后隧道渗流场及变形场的变化
规律, 且背景工程在仅有围岩压力条件下运营良好,
而在堵管高压下方才出现了病害。因此, 围岩相似
控制以渗透系数为核心, 对于围岩材料的其他参数相
似性尽量保证满足。参考于丽等^[20]、李铮等^[21]对围岩
相似材料的研究成果, 经渗透试验测试, 选取细砂材
料作为病害段围岩模拟材料, 测试结果及现场围岩渗
透系数如表 2 所示。

表 2 渗透系数测试结果

Table 2 Test results of permeability coefficient			
试验组号	渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$	试验均值 $/(cm \cdot s^{-1})$	现场值 ^[16] $/(cm \cdot s^{-1})$
1	1.06×10^{-3}	1.05×10^{-3}	1×10^{-3}
2	1.04×10^{-3}		
3	1.04×10^{-3}		

(3) 隧道结构及附属设施相似材料

考虑病害段处于 V 级围岩段落, 岩质较差, 二衬
为主要承载结构, 初支承载比重较小, 在参考类似试
验的基础上, 采用土工布等效模拟初支结构, 即对其
支护性能不予以考虑, 仅考虑其阻砂、透水、减渗 3
方面作用。依据李铮等^[19]研究成果, 最终选用 8 层(累
计厚度 5.9 mm) 土工布模拟初支。

为精细反映隧道结构及排水系统工作状态, 本试
验引入 3D 打印技术构建隧道结构模型及排水设施模
型, 同时 3D 打印用于模型制作的可行性、打印精度
已由文献^[22, 23]验证分析。考虑到隆起病害应属于
变形致灾类工程问题, 隧道结构模型为承载型构件,
其打印材料的选取以“材料弹模相似性为核心”较为
适宜, 故依照弹模相似比 ($C_E = 1:40$), 选取尼龙 11
作为隧道结构模型打印材料(尼龙 11 弹模为 1.06
 GPa , 现场结构等效弹模 34.1 GPa ^[16], 两者弹模比与
试验所需值较为接近, 而其他常用打印材料弹模多在
 1.5 GPa 以上)。需要说明的是, 尼龙 11 与试验所需材
料弹模量之间存在的一定差异, 会导致试验中隆起位

移较实际情况稍有偏小，但其结构变形规律应保持一致，故材料弹模差异性影响总体属于合理范围。对于排水系统模型，因其属于功能型构件，在试验中只需保证构件使用功能正常即可，无需遵循弹模相似，故优选经济性好、材料强度高的光敏树脂材料作为打印材料^[24]。

2.2 隧道结构及其附属设施模型制作

(1) 隧道主体结构模型打印制作

模型制作采用华曙高科 HS403P 打印机，其最大成型尺寸为 40 cm×40 cm×45 cm。纵断面上，考虑打印尺寸限制要求，选取 K1695+302—318 作为试验模拟段落，总长 14 m，经缩尺后为 35 cm。横断面上，依据支护结构设计图（二衬、仰拱、轨道、排水沟）绘制隧道结构轮廓图，见图 4（a）。通过三维建模软件（如 Inventor）构建隧道结构 3D 模型，同时根据排水系统现场布设参数，在模型中心断面掏空仰拱内的横向排水管，并沿纵向每隔 12.5 cm（缩尺）掏空左右侧横向连接管，掏空管道参数如表 3 所示，最终获得隧道主体结构 3D 模型，见图 4（b）。经打印材料优选（图 4（c））后，选择尼龙 11 材料打印制作其实体模型，见图 4（d）。需要说明的是，为避免打印模型二次粘结的不良影响，隧道结构的制作采取一次成型方式，其打印材料均为尼龙 11，不同部位未做区分打印处理。

(2) 隧道排水系统打印制作

由于侧沟、中心沟、横向排水管均在隧道主体结构模型中制作完成或已掏空预留，因此排水系统仅需完成环向、纵向排水管，其制作流程如下：

a) 确定排水管尺寸参数。环、纵、横向排水管原型分别为 Φ100 mm、Φ150 mm、Φ100 mm 打孔波纹管，经缩尺后其内径分别为 2.5，3.0，2.5 mm。同时，由于 3D 打印制品需满足“薄壁结构壁厚大于 0.8 mm”的要求，故确定环、纵排水管壁厚为 1 mm。综上所述，最终确定上述排水管参数如表 3 所示。

b) 建立排水系统 3D 模型。根据表 3 中的排水管尺寸参数及隧道结构轮廓图，建立对应 3D 模型，如图 5（a）所示，具体包括：①包络于隧道结构外表面的环向排水管，纵向布设间距 12.5 cm/环；②左右边墙脚部位的纵向排水管；③用于引流纵向排水管至隧道左右侧沟的横向连接管。同时，在环向、纵向排水管表面均匀布设有一系列排水小孔。

c) 3D 模型实用性优化。考虑到一体式模型存在着易因局部破损而导致整体失效的不足，故对排水系统 3D 模型进行优化处理：在保证优化模型与原模型内径尺寸一致的前提下，将原模型改为组装式模型，

共包括 5 种组件形式（图 5（b））。经上述优化后，试验期间避免了排水系统整体拆换的较大耗费。

d) 模型打印与组件拼装。选用光敏树脂材料进行排水系统模型的打印制作，经实体组件拼装，其成品效果如图 5（c）所示。隧道结构及其排水系统实体模型最终组装效果如图 5（d）所示。

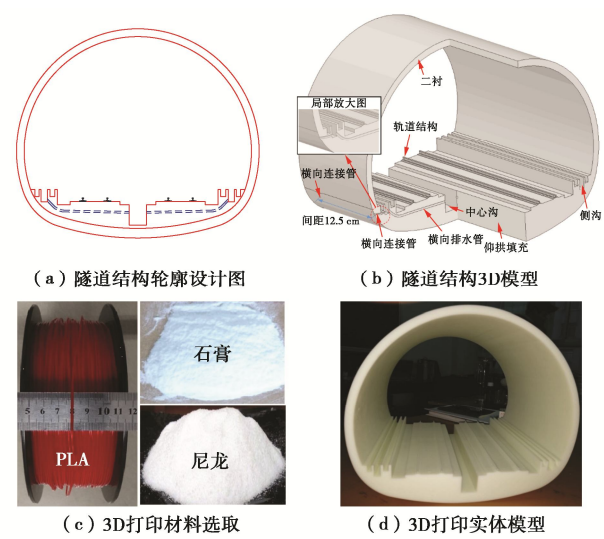


图4 高铁隧道 3D 打印制作流程

Fig. 4 3D printing process for high-speed railway tunnel

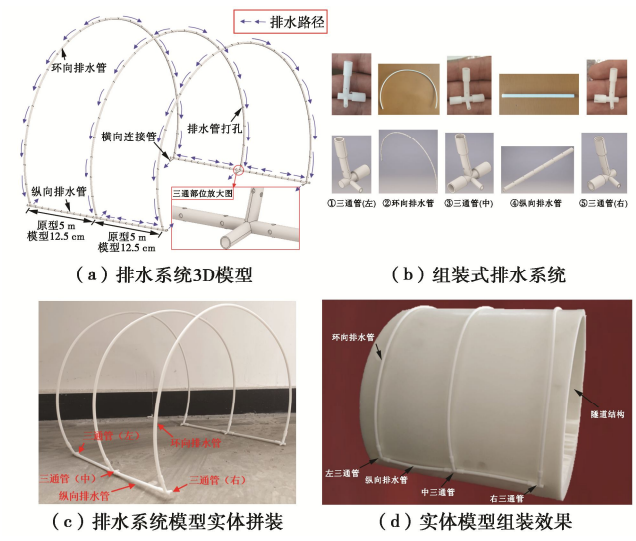


图5 排水系统 3D 打印制作流程

Fig. 5 3D printing process for drainage system

表3 各排水管打印模型尺寸参数

Table 3 Size parameters of drainage pipe model

类型	内径/mm	外径/mm	备注
环向排水管	2.5	4.5	—
纵向排水管	3.0	5.0	—
横向排水管	2.5	—	掏空预留于结构内，无需管壁加厚

2.3 堵管问题模拟方法

(1) 堵管模拟的堵塞部位

有关案例及研究成果^[1-2, 6, 9]表明, 由于管道转角的存在, 排水管三通部位(纵、环、横向管连接处, 如图 6(a))易发生泥砂等碎屑物质的淤积; 此外, 横向排水管道口处因最先接触管外空气, 地下水内的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子发生结晶反应, 长时间作用下易产生结晶堵塞物(图 6(b))。因此, 在实际工程中横向排水管(连接纵向管与侧沟)往往存在较大堵塞可能。综上所述, 本试验最终确定横向排水管道口作为堵塞部位。

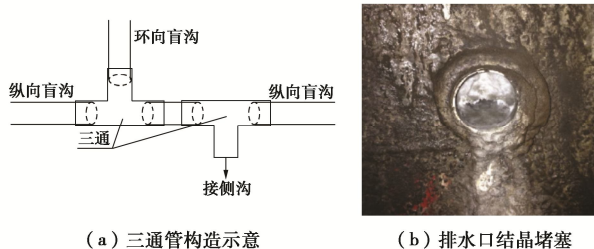


图 6 排水管堵塞频发部位示意图

Fig. 6 Frequent location of drainage pipe blockage

(2) 堵管模拟实施方法

依据面积占比为准则, 设计不同堵塞程度的排水口堵塞头, 具体包括堵塞 25%、50%、75%、100% 4 种类型, 如图 7 所示。以堵塞 25% 的堵塞头为例, 简要介绍其制作流程: ①构建可完全填充于横向排水管道口的全堵堵塞头 3D 模型(图 7(a))。②以管道排水面积堵塞 25% 为条件, 计算得到堵后管径应为 2.16 mm, 故在全堵堵塞头模型中心掏直径 2.16 mm 的圆孔, 即可获得堵塞 25% 的堵塞头 3D 模型; 采用光敏树脂材料将上述模型打印, 得到其实体模型如图 7(b)所示。此外, 为方便堵塞头的安装与拆除, 配套设计有更换插头, 试验期间仅需数秒即可完成单个堵管头的拆换。

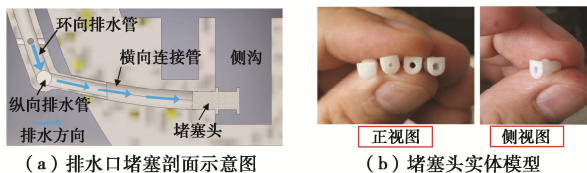


图 7 堵塞头制作及使用流程

Fig. 7 Fabrication and use process of pipe plugs

2.4 模型试验系统简介

(1) 试验系统组成

如图 8 所示, 本试验在自行设计的隧道渗流模拟试验系统上进行, 试验系统包括: ①渗流试验箱; ②渗流场控制系统; ③位移测试平台; ④数据采集平台。其中, 渗流试验箱尺寸为 2.4 m×1.8 m×0.35 m (高×宽×纵向长), 亚克力板模型箱中下部开设有与隧道

模型匹配的孔洞, 且所有内部缝隙与接缝部位均涂有防水胶, 以保证试验密封性。渗流场控制系统由进水管、总水箱、左右输水管、控制阀门构成, 左右输水管直达模型箱底部, 模型箱内输水管表面均匀钻设排水孔, 确保模型内进水均匀。位移测试平台主要为位移传感器的测试提供基础平台。数据采集平台主要用于收集孔隙水压力传感器、位移传感器的测试数据。



图 8 渗流试验系统及其组成

Fig. 8 Seepage test system and its composition

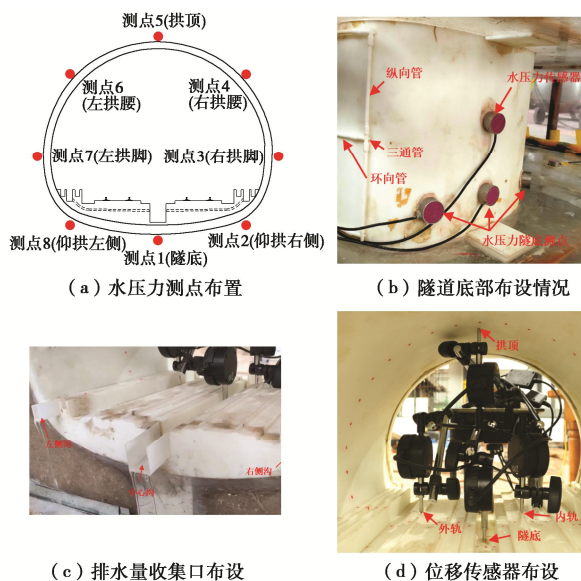


图 9 测试元件布置情况

Fig. 9 Layout of test sensors

(2) 测试项目及元件布置

根据试验内容, 试验需测试收集的数据类型包括: 结构外水压力、隧道排水量、典型部位位移量。上述数据采用的对应测试方法如下: ①结构外水压力, 于隧道模型外表面布设 8 个测点(图 9(a)), 通过微型孔隙水压力传感器获取全环水压力, 测试精度为 ± 5 Pa, 量程为 0~30 kPa; ②隧道排水量, 于隧道左、右侧沟及中心沟布设收集点(图 9(c)), 通过量杯收集单位时间内隧道排水进行量测; ③结构位移, 采用数显式千分计测取测点位移值, 测试精度为 0.001 mm, 量程为 0~10 mm, 并通过嵌入插件可实时监测测点的

位移变化。由于案例隧道病害特征主要是轨道变形超限,因此结构位移测点设置于隧底、内轨顶、外轨顶、拱顶(图 9(d)),以探究背景案例的变形致灾特征。

3 模型试验工况及结果分析

3.1 模型试验工况

为获得地层水头、堵塞程度对高铁隧道变形致灾病害的影响规律,在隧道埋深 65 m(原尺高度)的条件下,本次试验设置了 7 组地层水头主要工况(列于表 4),在每组地层水头下还细分了 5 种堵管程度工况,具体为全排(不设堵塞头即可)、堵塞 25%、堵塞 50%、堵塞 75%、全堵。需要说明的是,地层水头高度以隧道中心为 0 m 基础面进行计算。

表 4 试验工况

Table 4 Test conditions

工况	地层水头高度/m	堵管程度
1	0	
2	10	每组地层水头下包括 5 种堵塞程度细分工况,具体为全排、堵塞 25%、堵塞 50%、堵塞 75%、全堵
3	20	
4	30	
5	40	
6	50	
7	60	

3.2 模型试验流程

依据试验工况设置,本试验流程如下:

(1) 安装隧道及其排水系统(图 10(a)),布设水压力传感器,引出数据输出线;采用土工布包裹于隧道结构外,并确保两者间的密贴。

(2) 分层铺设细砂,并逐层压实(图 10(b)),杜绝地层填充不密实;填砂埋过隧道后,采用玻璃胶封堵模型试验箱与隧道模型之间的缝隙,确保其密封性。

(3) 填砂至 65 m(原尺高度)后,架立位移测试平台,布设位移传感器,并与数据采集系统相连;检验各传感器运行情况是否正常。

(4) 打开进水管,通过控制阀门调节左、右输水管注入速度,至地层水位达到 0 m 初始工况后,开始试验;每组地层水位工况下,于左右边沟共计 6 处排水口先后进行全排、堵塞 25%、堵塞 50%、堵塞 75%、全堵的堵管模拟,其中全排工况无需插入堵塞头,其余工况均需插入对应堵塞头(图 10(c));试验过程中依次采集隧道排水量、衬砌水压力、结构位移。同时,试验期间由专人调节控制阀门,确保地层水位稳定于试验预期高度。

需要说明的是,以上试验过程中排水量单次收集时间为 2 min,在连续 3 次测得的排水量无明显变化

后隧道渗流场基本稳定,方可测取衬砌水压力、结构位移数据。上一工况完成后,根据工况具体设置,改变地层水头或堵塞程度,开展下一工况试验。

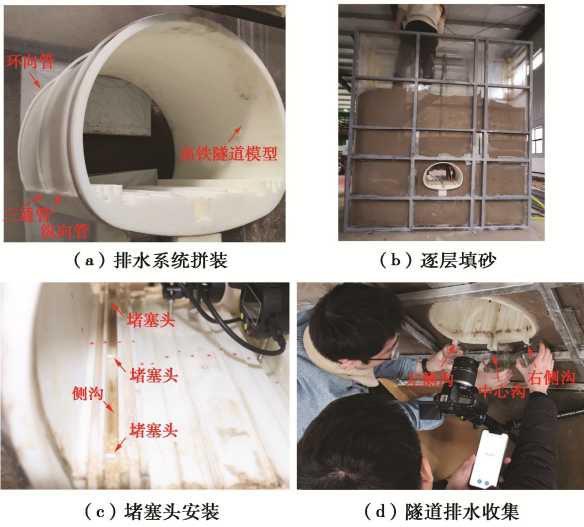


图 10 试验流程

Fig. 10 Test procedure

3.3 隧道排水量结果分析

为便于理解,后续试验分析数据均已转化为原尺值。地层水头从 0 m 升至 60 m,模型试验排水情况及排水量相关曲线如图 11, 12 所示。其中,图 11 分别展示了 20~60 m 水头全排工况下排水沟水流情况,以及 50 m 水头下从全排到全堵各堵塞工况水流情况。

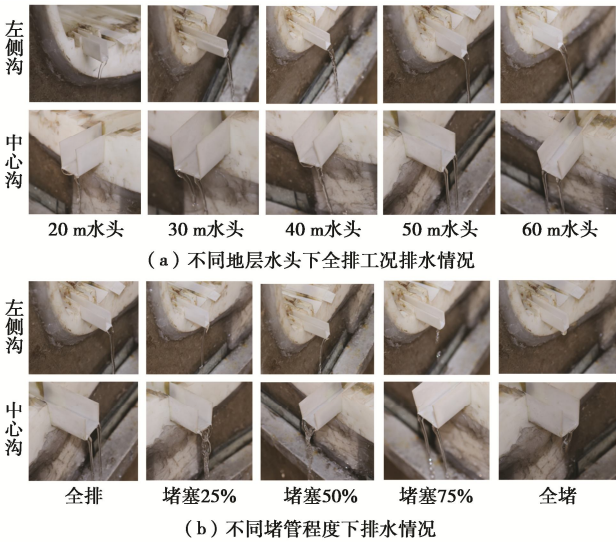


图 11 模型试验现场排水情况

Fig. 11 Field drainage conditions of model tests

从图 11, 12 可以得出:

(1) 从模型试验现场情况(图 11)来看,地下水通过左、右侧沟及中心沟排出隧道,排水系统工作状态良好且排水顺畅,可以认为本文构建的高铁隧道模型能够充分考虑排水设施的排水需求。

(2) 除全堵工况外,地层水头从 0 m 升至 60 m,

隧道排水量逐步增长,其中全排工况下每延米排水量从 $2.97 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $26.04 \text{ m}^3/\text{d}$ 。但是值得注意的是,排水量的增长是阶段式的(图 12(a)),具体可分为两阶段:①地层水头小于 30 m 时,随地层水头增长,隧道排水量基本呈线性增长;②地层水头处于 $30\sim 60 \text{ m}$ 时,排水量增长速率放缓,以全排工况为例, $30\sim 40 \text{ m}$, $40\sim 50 \text{ m}$, $50\sim 60 \text{ m}$ 对应的每延米排水增量分别为 3.01 , 2.69 , $1.87 \text{ m}^3/\text{d}$,增量降幅明显,且上述放缓趋势随堵管程度的加深而愈发明显。分析上述变化规律,应是隧道排水系统逐步趋于其极限排水能力所导致的。

(3)从直观来看(图 11(b)),全排至堵塞 50% 时隧道排水水流虽有减少但降幅不甚明显,而当堵塞进一步加深时(堵塞 50% 至全堵)排水水流明显减少。结合具体数值(图 12(b))分析:①若设 $30\sim 60 \text{ m}$ 水头下全排工况的排水率为 100% ,则堵塞 25% , 50% , 75% 、全堵工况对应的平均排水率分别为 91% , 79% , 42% , 1.3% ;②换言之,从全排到堵塞 50% 过程中,排水管堵塞引发的排水量减少比例仅有两成,而在堵塞 50% 以后堵塞程度对排水量的衰减影响方才逐步明显;③随堵管程度的逐步加深,隧道排水量总体呈反抛物线型发展趋势。此外,在全堵工况下或因局部堵塞头未完全密贴,致使仍存在极少量的水流排出隧道。

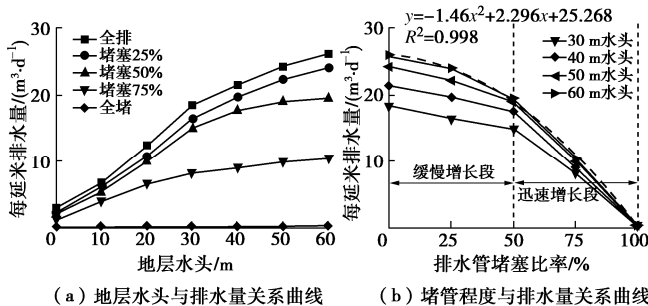


图 12 模型试验排水量相关关系曲线

Fig. 12 Correlation curves of drainage volume

3.4 隧道水压力结果分析

为便于了解全环水压情况,采用包络图型式对所测外水压力予以展示。根据试验结果,全排工况下 $30\sim 60 \text{ m}$ 的水压变化情况如图 13(a) 所示,而由于堵塞工况下水压力分布变化规律大体一致,故仅绘制最具代表性的 60 m 水头下水压力分布及各测点变化情况,如图 13(b), 13(c)。由图 13 可知:

(1)在全排条件下全环水压力呈现“隧底最大,拱顶、拱腰次之,墙脚最小”的分布规律,同时各点水压力均随水头升高而逐步增大,但是各点增幅存在着较大差异。地层水头从 30 m 升至 60 m ,仰拱底部水压力增长最为明显,其平均增量(测点 1, 2, 8 均值)为 194 kPa ;拱部增长次之,其平均增量(测点 4,

5, 6 均值)为 145 kPa ;墙脚处增长最小,其平均增量(测点 3, 7 均值)为 73 kPa 。分析上述现象,应与隧道排水系统降压特点有关:墙脚部位紧邻横向连接管,其周边地下水可在短时间内排入侧沟,即便地层水头升高,也不会引发水压力明显上升;而隧道其他部位排水能力则弱于墙脚部位,尤其是隧底地下水难以通过排水系统及时排导,最终引发了外水压力的大幅上升。

(2)隧道堵管后各测点均有不同程度上升,且其水压力变化存在如下特点:

a)随堵管程度加深,水压增幅先缓后快。从全排至堵管 50% ,拱部(测点 4, 5, 6)、底部(测点 1, 2, 8)、墙脚部位(测点 3, 7)水压力小幅增长;而从堵管 50% 至全堵,各部位水压力增幅明显加大。以墙脚部位为例,上述两阶段水压平均增量分别为 72 , 360 kPa ,增幅差异大。对于上述试验现象,应是由于堵管 50% 后隧道排水量骤降导致的。

b)堵管后不同部位的水压增长差异大。从全排到全堵,拱部、底部的水压力平均增量分别为 267 , 288 kPa ,而墙脚的平均增量达 433 kPa 。简而言之,堵管后墙脚的水压增长最为显著,这易使该部位出现相关结构问题^[2],应予以关注。分析此变化规律的原因:全排条件下墙脚部位排水泄压能力较强,而一旦堵管后其排水能力大幅降低,外水压力快速增长。

c)堵管后水压力分布由“扇贝型”转为“静水压型”。从图 13(b) 可知,全排条件下全环水压力呈现“隧底最大,拱顶、拱腰次之,墙脚最小”的“扇贝型”分布型式;而当排水管逐步堵塞后,隧道排水量几乎为 0 ,隧道结构承受外水压力基本为静水压力,即全环水压力分布最终演化为“静水压型”。

3.5 典型部位结构位移结果分析

在全排条件下典型位置位移测试结果如图 14(a) 所示。其中,隧底、内轨、外轨均以起位移为正,拱顶则以沉降位移为正。由图可知:

(1)全排条件下随着地层水头升高,底部结构隆起位移逐步增加,且具有“隧底>内轨>外轨”的量值特征。同时,位移量增长同样具有阶段性:①地层水头小于 20 m 时,底部结构位移量较小且增长缓慢,轨道最大位移仅为 3.00 mm ;②水头超过 20 m 后,底部位移迅速增长,至 60 m 水头时轨道位移已增至 32.96 mm 。分析此位移发展规律,应与 30 m 水头后隧道排水量增量骤减,进而引发底部水压力大幅增长有关。

(2)随地层水头升高,拱顶沉降呈现先增后减的发展。具体而言,水头小于 0 m 时拱顶位移较小且发展缓慢;水头 $20\sim 40 \text{ m}$ 时拱顶位移增长速率增大;在水头 40 m 后,拱顶沉降逐步从 12.42 mm 降至 4.58 。

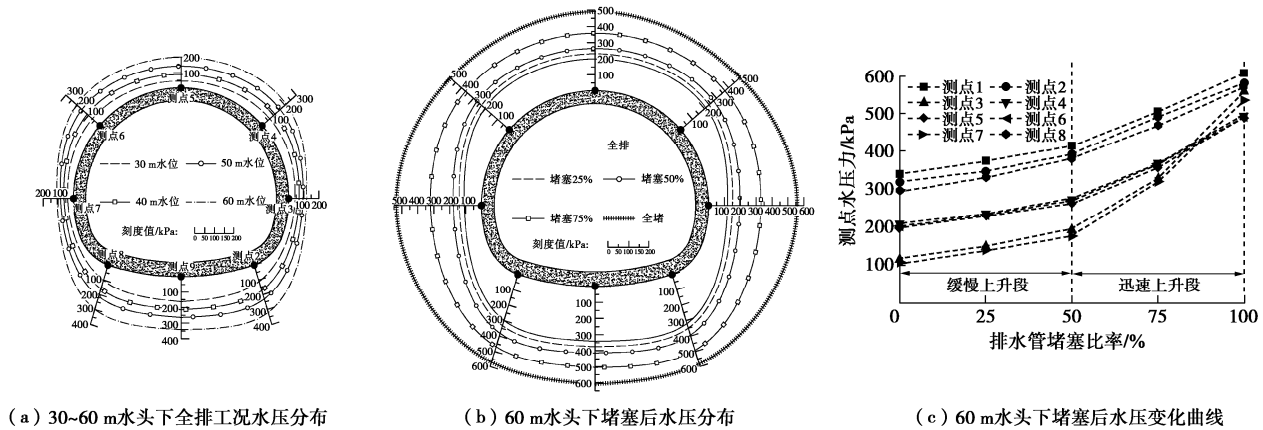


图 13 隧道结构外水压力测试结果

Fig. 13 Test results of external water pressure

为较好地展示现场病害演变情况(轨道超限),选取了最具代表性的内轨部位作为分析对象,提取了其20~60 m水头下不同堵管程度的位移测试数据,绘制位移发展图如图14(b)所示。由图可知:

(1) 类似于排水量、外水压力测试结果,堵管后内轨隆起位移亦呈现出“全排至堵塞50%时内轨位移增长缓慢,而堵管50%后位移增长显著”的阶段式增长,以60 m水头为例,上述两阶段位移增长量分别为2.18, 7.81 mm,增长量差异显著。分析上述现象,应是由于堵塞50%后排水量骤减引发外水压力显增,最终导致底部结构持续隆起所致。

(2) 结合现场病害位移(轨道隆起28.00 mm),在全排条件下50 m水头时、全堵条件下40 m水头时试验所得的内轨变形量分别为27.13, 26.98 mm,均与现场情况吻合较好。进一步考虑现场堵管情况与打印材料弹模的少许差异性,可认为该高铁隧道病害时地层水头高度应近40 m,同时上述结果亦侧面验证了3D打印技术在隧道模型试验中的可行性。

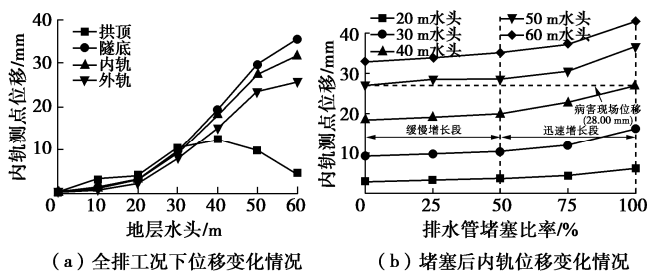


图 14 隧道典型部位位移测试结果

Fig. 14 Test results of displacement at typical locations

3.6 试验结果总结及讨论

为进一步厘清堵塞程度、结构位移、排水量之间的影响规律,汇总20, 40, 60 m地层水头下测试数据,绘制其相关曲线如图15所示。由图可知:

(1) 从全排到堵塞50%,各地层水头下隧道排

水量均小幅下降,内轨位移缓慢增长,不利影响较轻;堵塞50%后,排水量骤减直至不排水,而内轨位移发展显著,堵管影响逐步严重化。上述结果表明,堵管引发的不利影响并非随堵塞程度加深而线性增加,而是大体呈现二次函数发展规律,即堵管轻微时影响小、堵管严重时影响显著。

(2) 相较于低地层水头,在高水头下堵塞引起的位移增幅更为显著,以20, 40, 60 m水头为例,从全排到全堵的内轨位移增量分别为3.02, 8.43, 10.01 mm。上述数据表明,堵管情况的发生会进一步加深隧道病害严重程度,且随地层水头越高其不利影响更为显著。此外,在实际工程中隧道堵塞会削弱地层泄水能力,这将进一步促使地层水头的抬升,最终引发更为严重的病害后果。因此,隧道堵管问题的及时发现以及堵管后的及时疏导均应引起运营人员的重视。

(3) 堵管引发的不利影响大致以堵塞50%为转折,参考现场堵管统计及试验研究成果^[2, 6-7],岩溶地层隧道结晶堵管全周期通常为半年至一年,故建议以2~4月为周期开展排水系统定期巡检及疏通,同时在突发性强降雨时还应适当增加巡检次数,以预防因地表泥砂下渗引发的泥砂淤积堵管问题。

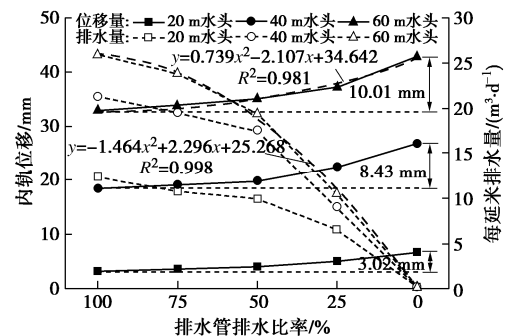


图 15 试验数据汇总分析图

Fig. 15 Summary analysis of test data

4 结论与展望

(1) 通过引入 3D 打印技术, 构建了高铁隧道结构及排水系统设施精细模型, 提出了切实可行的隧道堵管模拟方法及模拟装置, 开展了隧道堵管病害模拟试验并重现典型病害案例的发生, 验证了模拟方法及手段的可行性与有效性。上述模拟方法的提出对进一步丰富隧道病害研究手段、完善隧道病害机理体系均具显著现实意义。

(2) 依托麻拉寨隧道案例, 开展了堵管影响下相似模型渗流试验, 试验结果表明: 随堵塞程度加深, 隧道排水量呈开口向下型二次幂函数下降趋势, 具体为堵塞 50%前排水量小幅下降, 而堵塞 50%后隧道排水骤减直至不排水; 底部结构隆起位移存在“隧底>内轨>外轨”的量值关系, 且随堵塞程度加深, 隆起位移呈先慢后快的增长趋势; 受排水减少影响, 堵管后结构外水压力逐步由“隧底最大, 拱顶、拱腰次之, 墙脚最小”的扇贝型分布转为“静水压”型; 至全堵条件下地层水头 40 m 时, 试验位移结果与现场病害特征吻合良好, 推测该隧道病害时地层水头应近 40 m。

(3) 此外, 本文采用的点位移传感器监测方法因受内部布设尺寸限制, 仅能获取隧道典型部位位移量, 而通过 3D 打印技术可构建隧道结构及附属设施精细模型, 其整体变形应可全面获知。因此如何联合机器视觉与数字图像技术, 进一步揭示高铁隧道底部变形机理及病害化作用机制将作为后续研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 刘 坤, 刘新荣, 钟祖良, 等. 隧道排水系统非对称堵塞对衬砌外水压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, **14**(2): 369 - 378. (LIU Kun, LIU Xin-rong, ZHONG Zu-liang, et al. Regulation of external water pressure of tunnel lining with asymmetric blocked drainage system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, **14**(2): 369 - 378. (in Chinese))
- [2] 蒋雅君, 杜 坤, 陶 磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, **63**(7): 131 - 135. (JIANG Ya-jun, DU Kun, TAO Lei, et al. Investigation and discussion on blocking mechanism of drainage system in karst tunnels[J]. Railway Standard Design, 2019, **63**(7): 131 - 135. (in Chinese))
- [3] 铁路隧道设计规范: TB10003—2016[S]. 2016. (Code for Design of Railway Tunnel: TB10003—2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [4] 蒋雅君, 杜 坤, 廖甲影, 等. 岩溶隧道衬砌施工缝排水设施可维护性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, **63**(11): 91 - 96. (JIANG Ya-jun, DU Kun, MIAO Jia-ying, et al. Experimental research on maintainability of drainage facilities in lining construction joints of karst tunnel[J]. Railway Standard Design, 2019, **63**(11): 91 - 96. (in Chinese))
- [5] 高春君, 向立辉, 张学富, 等. 不同水位下隧道排水管结晶堵塞引起的衬砌应力分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, **38**(5): 49 - 55. (GAO Chun-jun, XIANG Li-hui, ZHANG Xue-fu, et al. Lining stress caused by crystallization clogging of tunnel drainage pipe at different water levels[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, **38**(5): 49 - 55. (in Chinese))
- [6] 周 卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D]. 西安: 长安大学, 2015. (ZHOU Zhuo. Study on the Plug of the Tunnel Drainage Pipe Mechanism Caused by Groundwater Seepage Crystallization in Karst Area and the Proposal of Treatment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese))
- [7] WU Z L, CUI Y J, BARRETT A G, et al. Role of surrounding soils and pore water in calcium carbonate precipitation in railway tunnel drainage system[J]. Transportation Geotechnics, 2019, **21**: 1 - 8.
- [8] JUNG H S, HAN Y S, CHUNG S R, et al. Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 476 - 486.
- [9] 刘 坤. 隧道排水系统局部堵塞后的衬砌外水压力及其受力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. (LIU Kun. Study on External Water Pressure and Force Characteristics of Tunnel Lining with Partial Blocked Drainage System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese))
- [10] 代鸿明. 运营铁路隧道水害引发的仰拱起鼓及衬砌开裂防治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, **53**(3): 202 - 206. (DAI Hong-ming. Prevention and treatment of invert heaving and lining cracking induced by water disasters in operating railway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, **53**(3): 202 - 206. (in Chinese))
- [11] CHEN Y F, CUI Y J, BARRETT A G, et al. Investigation of calcite precipitation in the drainage system of railway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **84**: 45 - 55.
- [12] 刘新荣, 刘 坤, 钟祖良, 等. 深埋隧道排水系统非对称

- 堵塞后渗流场的解析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(5): 1088 - 1100. (LIU Xin-rong, LIU Kun, ZHONG Zu-liang, et al. Analytical study on seepage field of the deep tunnel with asymmetric blocked drainage system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1088 - 1100. (in Chinese))
- [13] 李铁钟. 某高速铁路隧道无砟轨道上拱处治技术[J]. 铁道标准设计, 2018, **62**(5): 125 - 128. (LI Tie-zhong. Treatment technology for ballastless track uplift of a high speed railway tunnel[J]. Railway Standard Design, 2018, **62**(5): 125 - 128. (in Chinese))
- [14] 肖广智. 从当前铁路隧道衬砌典型病害谈设计施工改进措施[J]. 隧道建设(中英文), 2018, **38**(9): 23 - 29. (XIAO Guang-zhi. Discussion on design and construction improvement measures based on current typical diseases of railway tunnel lining[J]. Tunnel Construction, 2018, **38**(9): 23 - 29. (in Chinese))
- [15] 张会刚, 张广泽, 喻洪平, 等. 沪昆客专麻拉寨隧道岩溶发育规律及突水原因探析[J]. 路基工程, 2017(1): 208 - 212. (ZHANG Hui-gang, ZHANG Guang-ze, YU Hong-ping, et al. Analysis of karst development law and water burst cause of malazhai tunnel in Shanghai—Kunming Passenger dedicated railway[J]. Subgrade Engineering, 2017(1): 208 - 212. (in Chinese))
- [16] 阳军生, 李林毅, 方星桦, 等. 沪昆高铁贵州段麻拉寨隧道水害整治效果分析及安全性评价[R]. 长沙: 湖南中大设计院有限公司, 2017. (YANG Jun-sheng, LI Lin-yi, FANG Xing-hua, et al. Analysis of Effect on Water Damage Remediation and Safety Evaluation in the Mala Zhai Tunnel in Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Railway[R]. Changsha: Hunnan Zhongda Design Institute Co., Ltd., 2017. (in Chinese))
- [17] 中铁第二勘察设计院集团有限公司. 新建铁路沪昆客运专线长沙至昆明段参考图[Z]. 2010. (China Railway Second Survey and Design Institute Group. New Railway Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Line Changsha to Kunming Section Reference Map[Z]. 2010. (in Chinese))
- [18] LI P F, LIU H C, ZHAO Y, et al. A bottom-to-up drainage and water pressure reduction system for railway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **81**: 296 - 305.
- [19] 李 铮, 何 川, 杨赛舟, 等. 不考虑开挖扰动影响的隧道涌水量预测模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2499 - 2506. (LI Zheng, HE Chuan, YANG Sai-zhou, et al. Experimental study on tunnel inflow without considering the influence of excavation disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2499 - 2506. (in Chinese))
- [20] 于 丽, 方 霖, 董宇苍, 等. 基于围岩渗透影响范围的隧道外水压力计算方法模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(10): 85 - 95. (YU Li, FANG Lin, DONG Yu-cang, et al. Research on the evaluation method of the hydraulic pressure on tunnel lining according to the range of seepage field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(10): 85 - 95. (in Chinese))
- [21] 李 铮, 何 川, 高 翔, 等. 岩石隧道渗流模型试验相似材料的研制及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017(9): 39 - 45. (LI Zheng, HE Chuan, GAO Xiang, et al. Development and application of a similar material for rock tunnel seepage model test[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017(9): 39 - 45. (in Chinese))
- [22] 江 权, 宋磊博. 3D打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(1): 23 - 37. (JIANG Quan, SONG Lei-bo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(1): 23 - 37. (in Chinese))
- [23] ZUO Z B, GONG J, HUANG Y L, et al. Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, **208**: 350 - 360.
- [24] 李林毅, 阳军生, 王立川, 等. 3D打印技术在高铁隧道仰拱隆起病害模拟试验中的应用与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(7): 1369 - 1384. (LI Lin-i, YANG Jun-heng, WANG Li-huan, et al. Application and research of 3D printing technology in simulation test of invert heaving disease of high-speed railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(7): 1369 - 1384. (in Chinese))