

蔡直言, 伍毅敏, 许鹏, 等. 溶槽水位波动对隧道衬砌的力学影响模拟分析 [J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1270-1281.

DOI: [10.11932/karst20230609](https://doi.org/10.11932/karst20230609)

溶槽水位波动对隧道衬砌的力学影响模拟分析

蔡直言¹, 伍毅敏², 许鹏², 迟作强³, 黄民⁴, 伍浩然², 张家威²

(1. 中山大学土木工程学院, 广东珠海 519082; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 3. 山东省路桥集团有限公司, 山东济南 250021; 4. 中建三局第三建设工程有限责任公司, 湖北武汉 430074)

摘要: 岩溶隧道通常面临季节性溶槽水位波动带来的水害风险, 文章结合工程案例, 通过数值模拟, 量化分析不同水位和不同位置溶槽蓄水对隧道衬砌受力影响, 以揭示隧道水害风险的发生机制和演化特征, 主要结论: (1) 溶槽在季节性强降雨时发生水位波动, 隧道外水压力变化频繁, 导致隧道衬砌内力变化显著; 水位升高时, 结构受力恶化, 安全性大幅削减, 其中拱顶、边墙仍以小偏心受压模式承载, 而隧底部位承载模式由小偏心受压逐步发展为大偏心受压; 高水位时衬砌结构存在开裂、破损的风险; (2) 边墙部位溶槽蓄水对隧道造成偏压水荷载, 边墙安全系数最高下降 1.1; 地下水位上升, 偏压水荷载逐渐演化为均布水荷载, 结构受力影响差异性逐渐减小; (3) 季节性强降雨来袭, 加强泄水降压是解决水头上升、水压过大致使衬砌破坏的关键, 并重点关注边墙、隧底衬砌结构安全。

关键词: 公路隧道; 力学影响; 数值计算; 衬砌结构; 溶槽水位波动

中图分类号: U451.4 文献标识码: A

文章编号: 1001—4810 (2023) 06—1270—12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国岩溶总面积达 344.3 万 km², 占国土面积的 1/3 以上^[1-2], 随着交通路网的快速延伸, 岩溶区已经或将要修建大量的岩溶隧道。然而在岩溶区存在大量的岩溶腔、暗河等储水型构造, 因季节性降水、补给等原因, 在旱季时, 这些储水构造处于缺水低水位状态; 而当雨季来临时, 水量得到补充, 导致储水型构造中的地下水位快速上涨, 并通过溶槽(地下水沿可溶蚀岩石的节理裂隙进行溶蚀与侵蚀, 形成纵横交错、深度较大的沟槽)或岩溶裂(孔)隙不断在衬砌背后累积, 衬砌水压急剧增大, 进而产生水害, 严重威胁隧道衬砌结构安全^[3-7]。例如, 宜万铁路云雾山隧道施工期间, 一次强降雨导致一段衬砌开裂, 被迫

拆除重修^[8]; 贵州银山隧道施工中遭遇罕遇暴雨, 隧道竖直侧墙被突增岩溶水压溃(图 1), 破坏长度达 20 m^[9]; 湖北季家坡隧道穿越溶蚀区, 在特大暴雨期间衬背水压急剧增大, 导致二衬和底板严重压裂(图 2)、施工缝发生底鼓破裂涌水^[10]。

很多学者研究了岩溶地下水对隧道衬砌结构的宏观影响, 聂志凌^[11]通过数值模拟研究了充水溶洞不同位置、不同尺寸、不同距离以及溶洞内不同水压对隧道结构的影响。李贻伟^[12]通过“地层-结构”法模拟了岩溶地下水升降条件下的衬砌响应表明: 地下水位上升, 二次衬砌各部位的内力均有所增加, 结构安全系数减小, 而仰拱隅角部位的内力增加速率最大。朱海涛^[13]针对充水岩溶隧道, 对比分析了理论计算、数值模拟和现场监测得到的隧道衬砌外

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478473); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2018K019)

第一作者简介: 蔡直言(1993—), 男, 博士研究生, 工程师, 要从事隧道与地下工程水灾变防控研究、特殊复杂隧道设计工作。E-mail: caizhy37@mail2.sysu.edu.cn。

通信作者: 伍毅敏(1980-), 男, 副教授, 博士。E-mail: yiminwu531@csu.edu.cn。

收稿日期: 2022—04—20

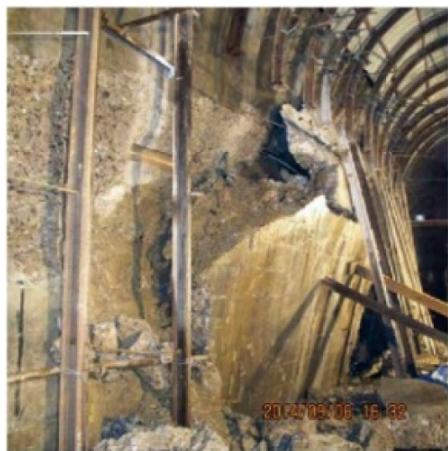
图 1 银山隧道边墙挤裂^[9]

Fig. 1 Cracked side wall of Yinshan tunnel

图 2 季家坡隧道二衬压裂^[10]

Fig. 2 Fracturing of the second lining of Jijiapo tunnel

水压力,最后采用监测数据中的历史峰值作为水压荷载,通过“荷载-结构”法进行结构计算。王一鸣^[14]依托高水压岩溶隧道工程,分析了固定水位条件下衬砌水压力和结构内力,表明:仰拱衬砌内力最大,安全系数最低,排水可削减作用在衬砌结构上的水荷载。屈若枫^[15]通过数值模拟研究了隧道顶部存在充水溶洞下的衬砌力学特征,表明:地下水位升高,拱顶竖向位移呈现增加的趋势,且二衬的拱顶位移明显小于初衬;衬砌之间接缝处的变形和剪应力最

大。谭信荣^[16]等分析岩溶管道发育位置、管道尺寸及管道内水头高度对衬砌内力的影响。任一凡^[17]通过数值模拟,探究了降雨对隧道衬砌外水压力的影响规律。余洪璋^[18]通过数值模拟,分析瞬时强降雨对铁路岩溶隧道衬砌强度的影响,研究表明当瞬时增加 50 m 水压时,衬砌结构安全性已被破坏。

以上研究对岩溶区隧道衬砌外水压力的认识依然十分有限,多以定性分析为主,没有突显出溶槽水位波动条件下衬砌外水压力分布特征。采用“荷载-结构”法计算时水压荷载取为定值或与实际情况不符,较难体现出岩溶水对衬砌结构的实际影响。因此,本文采用数值模拟的方法,定量分析溶槽水位波动条件下衬砌结构的响应及其差异性,为岩溶隧道灾害防治提供理论支撑。

1 工程概况及建模

1.1 工程概况

本研究以西南某高速公路隧道为研究对象。该隧道为左、右分离式隧道,左洞全长 3 230 m,右洞全长 3 315 m,最大埋深约 296 m;主洞隧道内轮廓净高 7.6 m,净宽 14.21 m,采用复合式衬砌。该隧道穿越季节性溶蚀区,灰岩为主,岩溶裂隙发育,地质纵断面见图 3。隧道通过区具有以下 3 个特点:地下水与地表连通性较强;涌水以及渗漏水发生具有季节性特征;存在与地表相通无充填型岩溶槽。

选取溶槽在隧道顶部与侧部发育的两种典型断面作为研究对象。典型断面为Ⅳ级围岩,衬砌见图 4,隧道理深约 100 m,支护参数如表 1:

同时根据隧址区的岩溶特性、降水特征,并结合地层结构以及岩性组合等因素,建立岩溶地下水的渗入、储存、运移、排泄过程(图 5)。

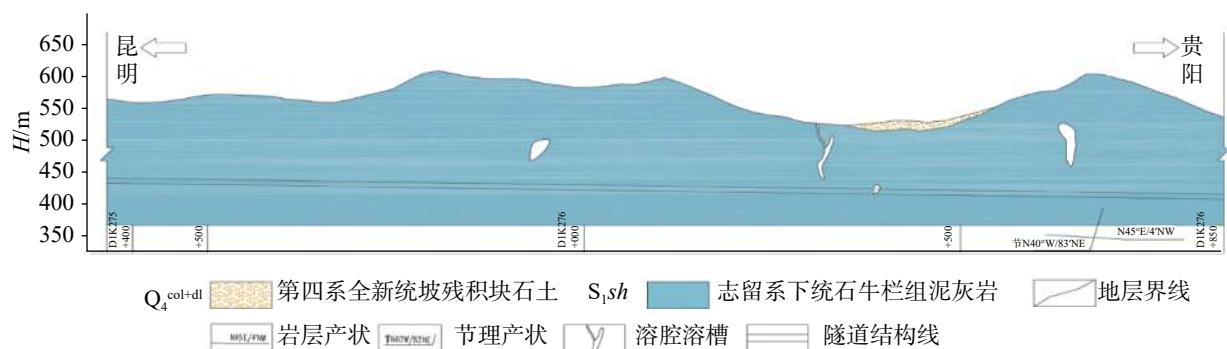


图 3 隧道地质纵断面

Fig. 3 Longitudinal section of tunnel geology

表 1 隧道Ⅳ级围岩支护参数

Table 1 Support parameters of Class IV surrounding rock of tunnel

初期支护		二次衬砌	
C25喷砼 全环21 cm	φ8钢筋网 全环@25×25 cm	φ22砂浆锚杆 拱墙@120×100 cm, L-3.5 m	C35钢筋砼 45 cm

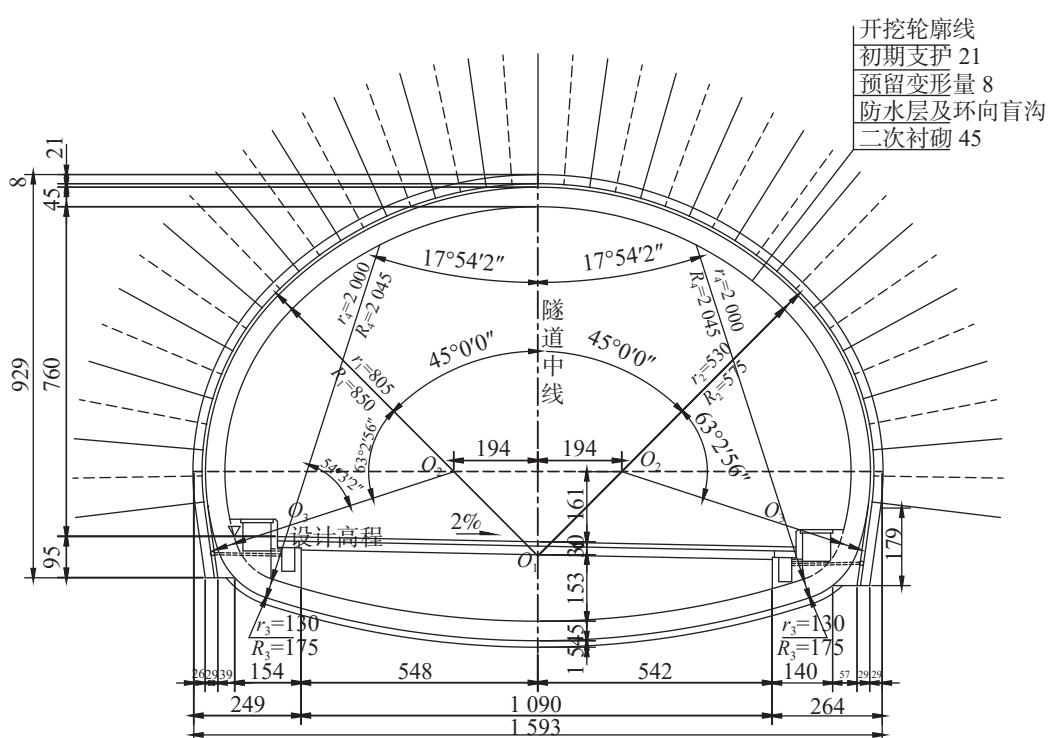


图 4 IV 级围岩深埋段衬砌(单位 mm)

Fig. 4 Lining of Class IV surrounding rock at the deep-buried section

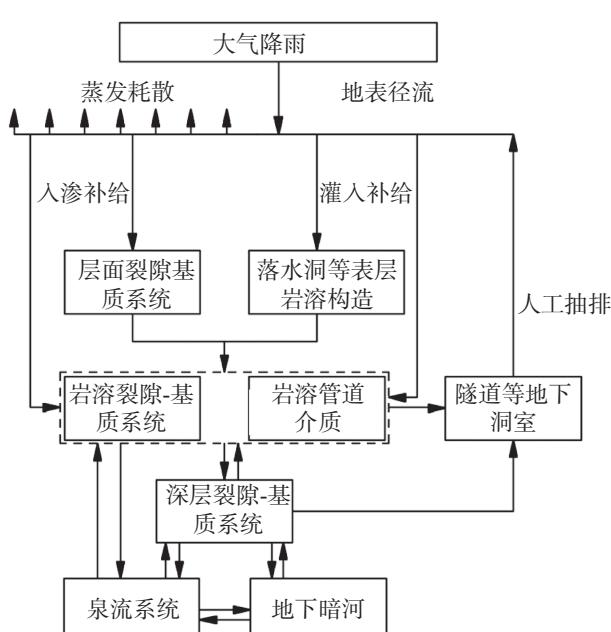


图 5 岩溶地下水渗入、储存、运移、排泄过程

Fig. 5 Process of karst groundwater infiltration, storage, migration and discharge

1.2 计算模型

荷载采用“水土分算”，即通过渗流计算得到衬砌外水压力，再将所得水压力和围岩压力作为外荷载加载在衬砌结构上，从而得到衬砌内力。

1.2.1 水压荷载计算模型

采用“地层—结构”法通过 Geo Studio 2018 R2 进行渗流计算。计算模型高 160 m、宽 120 m、纵向 1 m。衬砌结构包括初期支护、二次衬砌，拱脚处设置排水管。模型左右两侧和溶槽两侧为变水头边界，考虑到初期支护和排水管的存在，计算中二次衬砌不透水，横向排水管出口表面为 0 水头边界。

为了便于计算，以竖向长度和截面面积不变的原则对竖向溶槽进行简化，简化后的溶槽位于原溶槽顶部与底部水平距离的中心位置处，简化过程如图 6。

假定原溶槽的面积为 S，竖直高度为 h，顶部与底部的水平距离(两中心点的距离)为 d，水平距离中

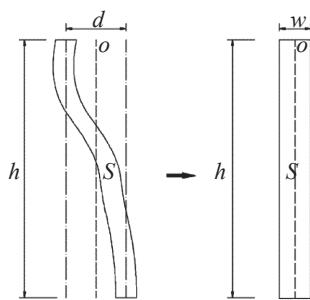


图 6 溶槽的简化过程示意

Fig. 6 Simplified process of water-eroded groove

心点为 O, 则简化后的溶槽宽度为:

$$w = \frac{S}{h} \quad (1)$$

简化后的溶槽位置即为水平距离中心点 O 处。并考虑溶槽与衬砌结构拱顶、边墙位置接触, 如图 7 所示为溶槽与隧道拱顶位置接触模型。

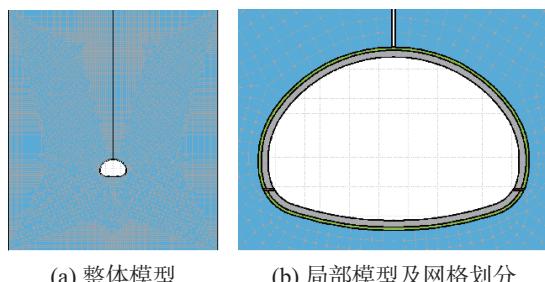


图 7 溶槽与衬砌边墙接触时的计算模型

Fig. 7 Calculation model of water-eroded groove in contact with lining side wall

1.2.2 衬砌内力计算模型

采用“荷载—结构”法通过 Midas GTX NX 进行结构内力计算, 荷载分为围岩荷载与水压荷载。用梁单元模拟二次衬砌, 采用 1 m 长受压弹簧单元模拟围岩与结构的相互作用, 并在受压弹簧末端进行全约束。围岩压力竖直、水平加载, 水压力径向加载。计算模型如图 8。

1.3 计算工况

根据地质勘探与现场降雨条件下地下水连通试验, 分析季节性强降雨后断面存在地下水位迅速上升的可能, 同时参考类似地质条件下因降雨引发的动态水位幅度可达 60 m 的状况^[19], 设置 5 种工况(表 2): ①无水工况, 作为有水工况的对比组; ②地下水位距离地表 20 m; ③地下水位距离地表 40 m; ④地下水位距离地表 60 m; ⑤地下水位距离地表 80 m。

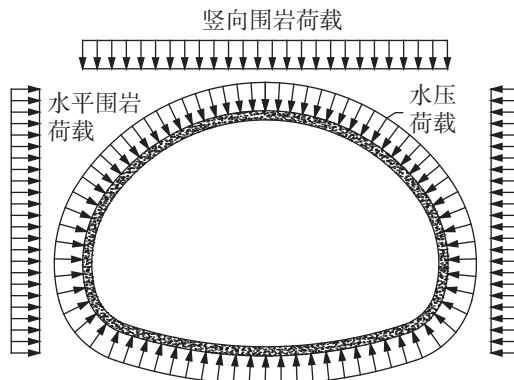


图 8 “荷载—结构”法计算模型

Fig. 8 Calculation model of "load-structure" method

表 2 季节性降雨导致水位升降时的计算工况

Table 2 Calculation work conditions for the rise and fall of water level due to seasonal rainfall

工况	溶槽位置	水位/m	工况	溶槽位置	水位/m
1-0	拱顶	/	2-0	边墙	/
1-1	拱顶	140	2-1	边墙	140
1-2	拱顶	120	2-2	边墙	120
1-3	拱顶	100	2-3	边墙	100
1-4	拱顶	80	2-4	边墙	80

(注: 拱顶溶槽宽 0.25 m, 竖直高度 100 m; 边墙溶槽宽 0.25 m, 竖直高度 108 m。)

(Note: width of vault water-eroded groove=0.25 m; vertical height=100 m; width of the water-eroded groove of side wall=0.25m; vertical height=108 m)

水位高度以计算模型底部边界为基准线向上计算, 单位为 m, 例如水位高度 140 m 表示距离地表 20 m。

同时, 为了进一步验证边墙处溶槽的影响, 增设对照组, 即不同水位无溶槽工况(表 3)。

表 3 无溶槽时的计算工况

Table 3 Calculation work conditions without water-eroded groove

工况	溶槽位置	水位/m
3-1	/	140
3-2	/	120
3-3	/	100
3-4	/	80

1.4 计算荷载

结合隧道地勘资料及《JTG3370.1-2018 公路隧道设计规范》(以下简称《隧规》)^[20], 选取的计算参数见表 4。

荷载及荷载组合为围岩压力+水压荷载+结构自重, 水压荷载通过渗流计算取得, 各作用的组合系数

表 4 数值模拟计算参数
Table 4 Calculation parameters of numerical simulation

材料名称	弹性模量/MPa	密度/kg·m ⁻³	泊松比	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	渗透系数/cm·s ⁻¹	弹性抗力系数/MPa·m ⁻¹
石灰岩	23 500	2 300	0.28	30	450	1.65×10^{-5}	600
初期支护	25 000	2 500	0.2	—	—	1.25×10^{-6}	/
二次衬砌	30 000	2 500	0.2	—	—	不透水	/
排水管道	25 000	2 500	0.25	—	—	1×10^{-3}	/

取为 1。隧道埋深约 100 m, IV 级围岩, 岩石类型为中风化石灰岩, 根据《隧规》计算得到围岩垂直平均布力为 104.33 kPa, 水平均布力为 41.75 kPa。同时根据《JTG/T D70-2010 公路隧道设计细则》^[21] 中关于双车道分离式隧道复合式衬砌的支护承载比建议值, 将二次衬砌荷载分担比取为 40%。

2 顶部溶槽蓄水对隧道的影响分析

2.1 隧道水压分布特征

2.1.1 渗流计算结果

由于篇幅有限, 仅展示距离地表 20 m 一种水位条件下的计算结果图(图 9)。

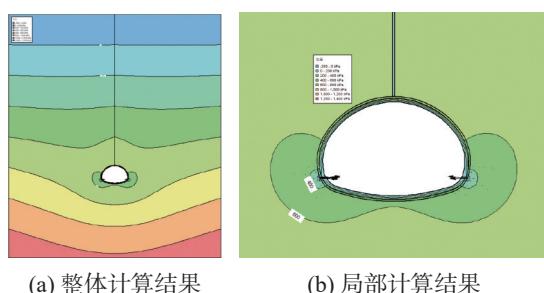


图 9 距离地表 20 m 水位条件下的渗流计算结果

Fig. 9 Seepage calculation results at the 20-meter water level from the surface

2.1.2 水压分布特征

将渗流计算所得水压体现在隧道断面上(图 10)。随着地下水位的升高隧道外水压力显著增大, 其中溶槽与隧道接触部位、拱顶以及隧底增幅较为明显, 而拱脚处因受排水影响增幅较小。各工况下, 水压力量值均存在“拱顶最大, 隧底、边墙次之, 拱脚排水处最小”的分布规律。水位每升高 20 m, 隧道拱顶、边墙、排水口、拱脚、隧底的水压增长值较为稳定, 分别约为 200 kPa、112.8 kPa、17.8 kPa、81.4 kPa、

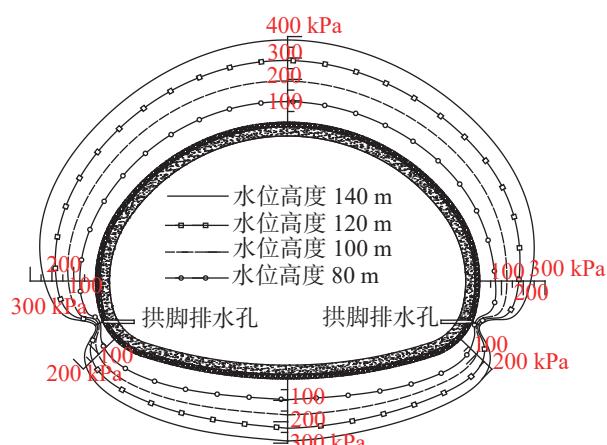


图 10 蓄水溶槽在不同水位条件下的隧道水压分布图

Fig. 10 Tunnel water pressure distribution of water-eroded groove of water storage at different water levels

128.5 kPa。

2.2 衬砌受力特征

2.2.1 衬砌计算结果

由于篇幅有限, 只展示距离地表 20 m 一种水位条件下的计算结果图(图 11), 并提取关键部位内力、应力(表 5, 表 6)。

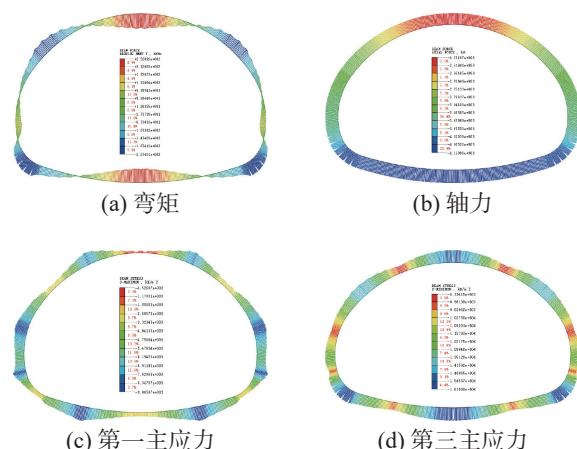


图 11 距离地表 20 m 水位条件下的隧道受力情况

Fig. 11 Internal force of tunnel lining at the 20-meter water level from the surface

表 5 溶槽在隧道拱顶时不同水位条件下隧道受力情况 1

Table 5 Stress of tunnel lining at different water levels when the water-eroded groove is at tunnel vault 1

项目	拱顶					边墙					
	水位/m	轴力/kN	弯矩/kN·m	k	σ_1/kPa	σ_3/kPa	轴力/kN	弯矩/kN·m	k	σ_1/kPa	σ_3/kPa
无水	-896.8	102.9	8.7	1 055.9	-5 041.7	-	-1 232.3	20.0	9.8	-2 146.9	-3 330.0
80.0	-1 567.1	140.3	5.5	675.1	-7 640.2	-	-1 902.9	31.2	6.3	-3 303.9	-5 153.3
100.0	-2 230.7	180.6	4.0	394.7	-10 309.1	-	-2 567.2	42.9	4.7	-4 432.6	-6 977.2
120.0	-2 899.3	207.1	3.2	-306.5	-12 579.2	-	-3 233.9	66.5	3.6	-5 214.8	-9 158.1
140.0	-3 572.0	232.8	2.7	-1 039.2	-14 836.2	-	-3 904.6	90.2	2.3	-6 005.6	-11 348.1

表 6 溶槽在隧道拱顶时不同水位条件下隧道受力情况 2

Table 6 Stress of tunnel lining at different water levels when the water-eroded groove is at tunnel vault 2

项目	拱脚					隧底					
	水位/m	轴力/kN	弯矩/kN·m	k	σ_1/kPa	σ_3/kPa	轴力/kN	弯矩/kN·m	k	σ_1/kPa	σ_3/kPa
无水	-1 294.6	-53.5	8.3	-1 292.1	-4 461.7	-	-1 358.7	1.5	9.7	-2 975.5	-3 063.0
80.0	-1 976.3	-84.7	5.3	-1 883.5	-6 899.9	-	-2 021.9	0.1	6.5	-4 492.5	-4 493.8
100.0	-2 651.8	-114.5	3.9	-2 501.4	-9 284.4	-	-2 682.5	-3.3	4.9	-5 863.1	-6 059.0
120.0	-3 343.2	-142.3	3.1	-3 213.1	-11 645.3	-	-3 394.0	114.1	3.2	-4 160.3	-10 924.3
140.0	-4 038.8	-171.3	2.6	-3 901.0	-14 049.4	-	-4 109.8	226.3	2.2	-2 428.0	-15 837.9

2.2.2 衬砌受力分析

根据轴力(图 12)、弯矩变化(图 13)可知, 地下水位的存在(特别是水位升降条件下)极大地改变了隧道的受力状况。随着地下水位的升高, 衬砌各关键部位所受轴力逐渐增大, 且增长幅度基本满足“拱顶>边墙>拱脚>隧底”, 这与拱顶处有与其接触的汇水溶槽有关, 即越靠近溶槽影响程度越大, 结构响应也就越明显。弯矩量值基本上随着地下水位的升高逐渐增大, 且隧底弯矩量值增长显著, 呈现出“内侧受拉→外侧受拉→内侧受拉”变化的特点, 在

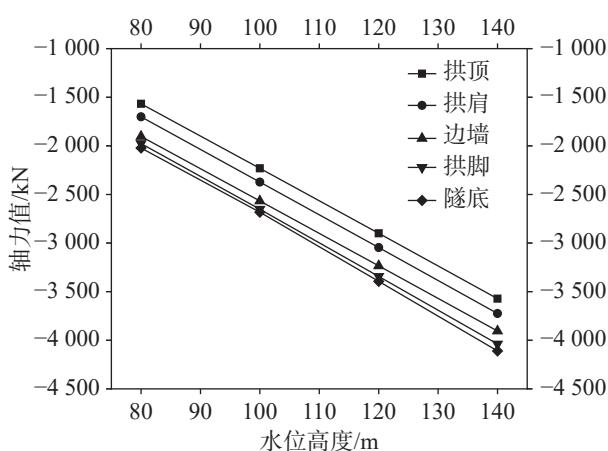


图 12 隧道关键部位轴力变化

Fig. 12 Axial force changes at the key points of tunnel

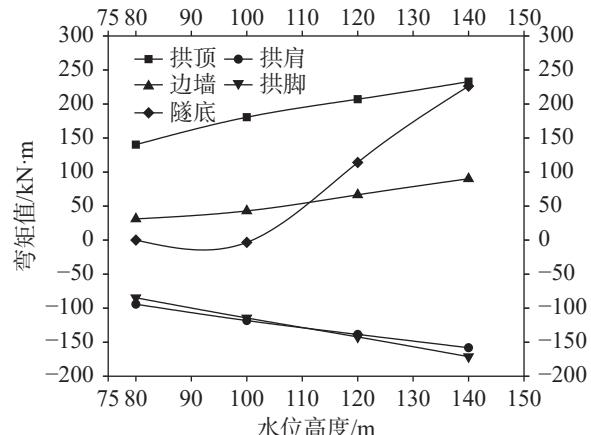


图 13 隧道关键部位弯矩变化

Fig. 13 Bending moment changes at the key points of tunnel

140 m 高水位条件下达到 226.3kN·m, 与此时拱顶的 232.8 kN·m 接近。

隧道各关键部位的主应力值除隧底第一主力外均随着地下水位的升高逐渐增大, 隧底第一主应力先增大后减小(图 14)。拱顶第一主应力由受拉逐渐转变为受压。隧底主应力在地下水位为 100 m 时发生明显改变, 其第一主应力明显减小, 第三主应力明显增大。相对于无水情况, 隧道各关键部位基本满足水位越高应力变化幅度越大(正值表示增加, 负值表示减小), 第一主应力变化最大的是拱顶和拱脚, 分别达到 198%、202%, 其次是边墙、隧底; 第三主应

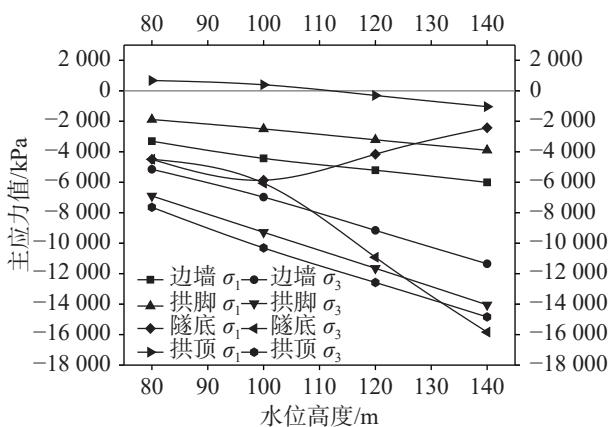


图 14 隧道关键部位主应力变化

Fig. 14 Principal stress changes at the key points of tunnel

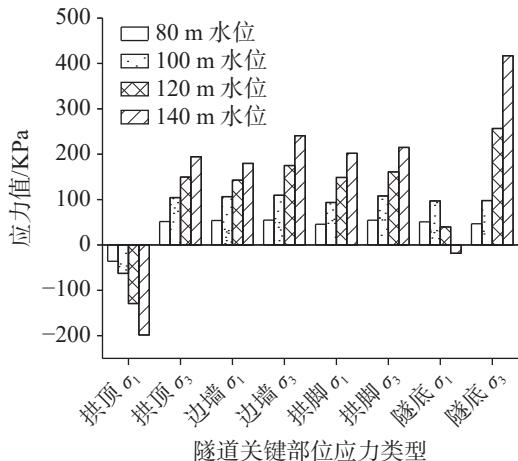


图 15 隧道关键部位主应力变化幅度

Fig. 15 Variation amplitude of principal stress at the key points of tunnel

力变化最大的是隧底, 达到 417%, 其次依次是边墙、拱脚、拱顶(图 15)。

随着地下水位的升高, 拱顶沉降和仰拱隆起值越来越大, 当水位距离地表 20 m 时, 拱顶沉降值达到 16.6 mm, 仰拱隆起值达到 12.6 mm(图 16)。边墙、隧底安全系数显著降低, 最高水位时, 边墙、隧底安全系数分别为 2.3 和 2.2(图 17), 已经小于《隧规》要求的限制 2.4, 具有结构破坏的可能。

综上所述, ①当地层无水条件下, 衬砌结构最危险点位于拱脚处, 其安全系数为 8.3, 能够满足规范限值要求, 表明无水条件下衬砌安全性良好; ②随着地下水位的升高, 衬砌结构各部位内力变化显著, 结构安全系数削减明显, 其中拱顶、边墙部位内力增长明显, 仍以小偏心受压模式承载, 而隧底部位承载模式由小偏心受压逐步发展为大偏心受压; ③水位距离地表 20 m 时, 边墙、隧底部位安全系数均

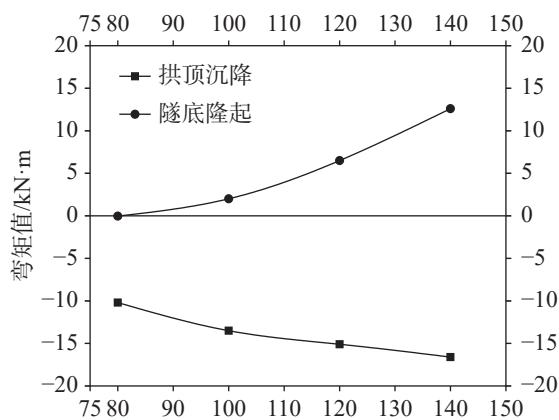


图 16 隧道关键部位位移变化

Fig. 16 Displacement changes at the key points of tunnel

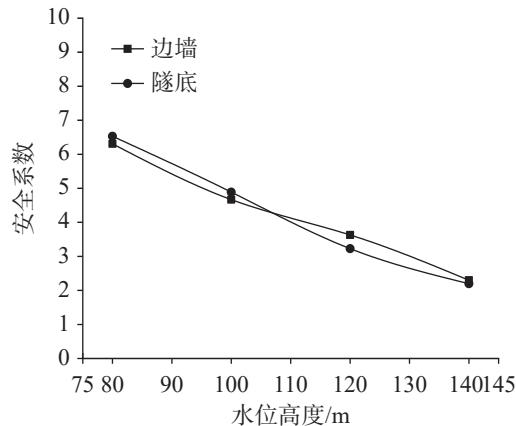


图 17 隧道边墙、隧底安全系数变化

Fig. 17 Change of safety factor of tunnel side wall and tunnel inverted arc

较小, 已小于《隧规》中“结构安全系数不得小于 2.4”的限值要求, 若考虑其他不利因素影响, 则衬砌结构存在开裂、破损的可能。上述计算分析结果与现场病害特征、病害位置基本吻合, 验证了数值模型的准确性。

3 侧部溶槽蓄水对隧道的影响分析

当溶槽位于隧道侧部及边墙处时易对衬砌造成偏压水荷载, 因此本节侧重分析隧道边墙处有、无蓄水溶槽这两类条件下的结构受力。

3.1 隧道水压分布特征

3.1.1 渗流计算结果

由于篇幅有限, 只展示 80 m 水位条件下的计算结果图(图 18)。

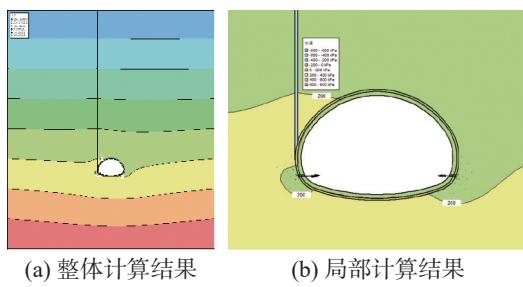


图 18 80 m 水位条件下的渗流计算结果

Fig. 18 Seepage calculation results at the 80-meter water level from the surface

3.1.2 水压分布特征

将渗流计算所得水压体现在隧道断面上(图 19)。当汇水溶槽与隧道边墙位置接触时, 各工况下, 水压力量值均存在“边墙最大, 拱顶、隧底次之, 拱脚排水处最小”的分布规律。水位每升高 20 m, 隧道拱顶、左边墙、左排水口、左拱脚、隧底、右拱脚、右排水口、右边墙的水压增长值较为稳定, 分别约为 187.0 kPa、194.4 kPa、23.0 kPa、99.0 kPa、138.3 kPa、83.3 kPa、18.2 kPa、112.2 kPa, 可见接触及其附近部位的水压增长值大于远处。

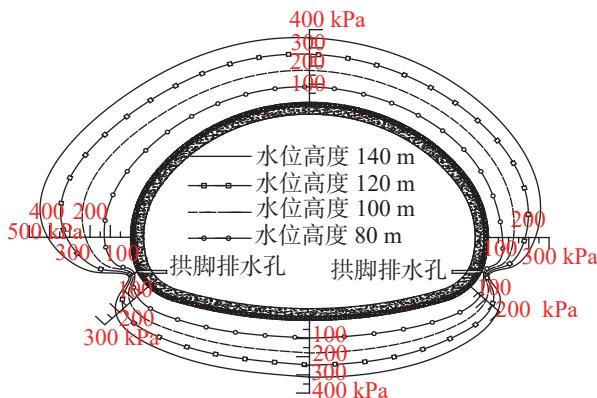


图 19 蓄水溶槽在不同水位条件下的隧道水压分布图

Fig. 19 Tunnel water pressure distribution of water storage under different water levels

3.2 衬砌受力特征

3.2.1 衬砌计算结果

由于篇幅有限, 只展示 20 m 水位条件下的计算结果图(图 20、图 21), 并提取关键部位内力、应力(表 7、表 8、表 9)。

3.2.2 衬砌受力分析

由以上的计算结果可知, 当溶槽在隧道边墙处

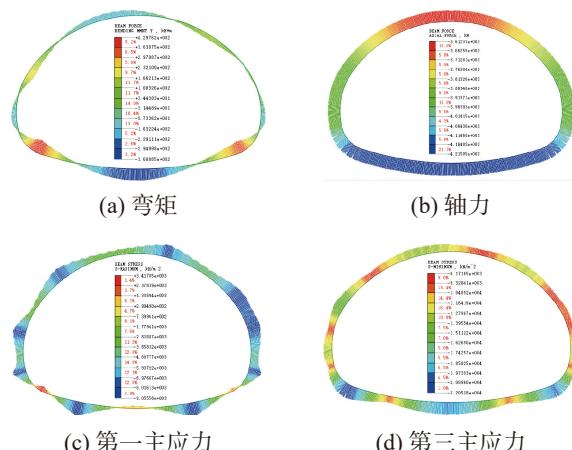


图 20 距离地表 20 m 水位条件下的隧道受力情况

Fig. 20 Internal force of tunnel lining at the 20-meter water level from the surface

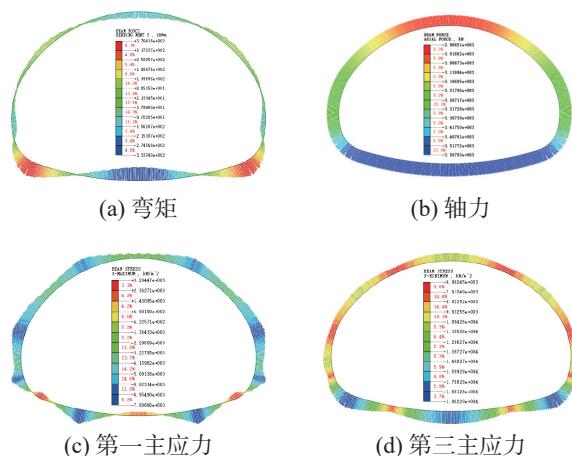


图 21 无溶槽距离地表 20 m 水位条件下的隧道受力情况

Fig. 21 Internal force of tunnel lining at the 20-meter water level from the surface without water-eroded groove

时, 衬砌结构各关键部位的受力状况与溶槽在拱顶时基本一致。即基本满足: 随着地下水位的升高, 衬砌结构各关键部位所受轴力、弯矩(量值)逐渐增大, 结构安全系数逐渐减小的规律。当总水头高度为 140 m 时, 各处轴力、弯矩量值达到最大, 此时隧底处安全系数为 2.1, 拱脚处为 2.3, 已小于《隧规》中“结构安全系数不得小于 2.4”的限值要求, 考虑其他不利因素, 衬砌结构存在破损的可能。由于蓄水溶槽处于隧道边墙左侧, 造成隧道结构承受左侧偏压水荷载, 明显的特征是隧道拱顶和隧底承受负弯矩(外侧受拉)、拱脚处承受正弯矩(内侧受拉)。隧道左侧边墙、拱脚所承受轴力、弯矩均大于右侧边墙、拱脚, 而安全系数反之, 安全系数差值在 0.1~0.3 之间, 且随着地下水位的上升该差值呈减小趋势。同一水位

表7 溶槽在隧道边墙时不同水位条件下隧道受力情况1

Table 7 Stress of tunnel lining at different water levels when the water-eroded groove is at tunnel side wall 1

项目 水位/m	拱顶			隧底			左边墙		
	k	σ_1	σ_3	k	σ_1	σ_3	k	σ_1	σ_3
80	5.9	-172.9	-6 780	6.5	-4 473	-4 489	6.2	-3 110	-5 298
100	4.4	-1 316	-8 607	4.3	-4 181	-7 847	4.3	-3 978	-7 375
120	3.6	-2 914	-10 078	2.8	-1 657	-13 690	3.4	-4 612	-9 774
140	3	-4 612	-11 445	2.1	974.4	-19 701	2.7	-4 932	-12 520

表8 溶槽在隧道边墙时不同水位条件下隧道受力情况2

Table 8 Stress of tunnel lining at different water levels when the water-eroded groove is at tunnel side wall 2

项目 水位/m	右边墙			左拱脚			右拱脚		
	k	σ_1	σ_3	k	σ_1	σ_3	k	σ_1	σ_3
80	6.5	-3 558	-4 915	5.3	-1 832	-6 918	5.4	-2 217	-6 600
100	4.6	-4 402	-7 034	3.7	-2 443	-9 344	3.9	-2 577	-9 285
120	3.5	-4 814	-9 670	2.9	-2 836	-12 137	3	-2 428	-12 616
140	2.8	-5 040	-12 480	2.3	-2 749	-15 455	2.3	-1 213	-17 057

表9 无溶槽时不同水位条件下隧道受力情况

Table 9 Stress of tunnel lining at different water levels without water-eroded groove

项目 水位/m	拱顶			隧底			边墙			拱脚		
	k	σ_1	σ_3									
80	6.5	490.5	-6 428	7.4	-3 957	-4 003	7.2	-2 907	-4 514	6	-1 654	-6 077
100	4.8	92.5	-8 416	5.4	-4 661	-5 681	5.4	-3 823	-5 983	4.6	-2 112	-8 044
120	4.1	-1 383	-9 398	3.2	-1 130	-11 991	4.2	-4 126	-8 109	3.6	-2 689	-10 048
140	3.5	-2 623	-10 561	2.4	1 763.6	-17 617	3.4	-4 414	-10 201	2.9	-2 557	-12 747

下隧道左侧边墙的最大主应力大于右侧边墙,且应力差值百分比随着地下水位的上升从12.6%减小到2.1%;最小主应力小于右侧边墙,应力差值百分比随着地下水位的上升从7.2%减小到0.3%。

隧道拱顶处安全系数差值随地下水位的上升依次为0.6、0.4、0.5和0.5;隧道边墙处依次为1.0、1.1、0.8和0.7;隧道拱脚处依次为0.7、0.9、0.7和0.6;隧底依次为0.9、1.1、0.4和0.3。可见地下水位的上升,两类条件下的隧道结构安全系数差值有减小的趋势。受力差异性逐渐减小可解释为:隧底及以下为弱透水岩层,可看作不能发生地下水的渗流。当地下水位较低且没有超过隧道结构竖向高度时,溶槽一侧的衬砌必然受到水压荷载,而另一侧没有水压荷载,因此造成衬砌受到偏压荷载,偏压一侧衬砌所受应力大而安全系数较小,因此衬砌两侧安全系数差值较大。而后随着地下水位的升高,地下水位漫过了隧道拱顶,使隧道衬砌全环受到水压荷载,荷载偏压程度逐渐减小及受力逐渐均匀,因此衬砌安全系数

差值逐渐减小,即受力差异性逐渐减小。溶槽的存在,使边墙、隧底安全系数下降幅值最大达到1.1,故应重点关注边墙、隧底结构安全。

4 结 论

针对岩溶隧道通常面临季节性溶槽水位波动带来的水害风险,通过数值模拟,量化分析了不同水位和不同位置溶槽蓄水对隧道衬砌受力影响,主要结论如下:

(1)溶槽在季节性强降雨时发生水位波动,隧道外水压力变化频繁,导致隧道衬砌内力变化显著;水位升高时,结构受力恶化,安全性大幅削减,其中拱顶、边墙仍以小偏心受压模式承载,而隧底部位承载模式由小偏心受压逐步发展为大偏心受压;高水位时衬砌结构存在开裂、破损的风险;

(2)边墙部位溶槽蓄水对隧道造成偏压水荷载,边墙安全系数最高下降1.1;同水位下的安全系数小

于另一侧对应部位, 安全系数差值在 0.1~0.3 之间, 且随着地下水位的逐渐上升该差值呈减小趋势, 即由偏压水荷载逐渐演化为均布水荷载, 对结构受力差异性影响逐渐减小;

(3) 在季节性强降雨引发的地层高水位条件下, 排水系统虽发挥了一定泄压作用, 但是衬砌仍承受着较高水压力, 尤其是在边墙、隧底部位还存在结构安全性无法满足的可能。因此, 季节性强降雨来袭, 应确保排水系统排水通畅, 加强泄水降压是解决水头上升、水压过大致使衬砌破坏的关键, 并重点关注边墙、隧底衬砌结构安全。

参考文献

- [1] 左太安, 张凤太, 于世杰, 黎娇, 樊昊, 叶丹. 中国岩溶地区石漠化贫困问题研究进展[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 915-927.
ZUO Taian, ZHANG Fengtai, YU Shijie, LI Jiao, FAN Hao, YE Dan. A study on poverty caused by rocky desertification in karst areas of China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(6): 915-927.
- [2] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002(3): 365-370.
LI Yangbing, HOU Jianjun, XIE Deti. The recent development of research on karst ecology in Southwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002(3): 365-370.
- [3] 王刚, 王立川, 仇文革, 龚伦, 吴剑. 关于季节性岩溶管道流对某快速铁路隧道衬砌破坏的分析与思考[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 210-218.
WANG Gang, WANG Lichuan, QIU Wenge, GONG Lun, WU Jian. Analysis and considerations of an express railway tunnel lining failure by seasonal karst conduct flow[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 210-218.
- [4] 郑波, 吴剑, 郭瑞. 季节性岩溶隧道结构安全预警体系构建及对策[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(Suppl.2): 67-72.
ZHENG Bo, WU Jian, GUO Rui. Building-up of a safety early-warning system for seasonal karst tunnel structure and its prevention countermeasures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(Suppl.2): 67-72.
- [5] 陈仲达, 林志, 陈相, 杨红运, 陆原恩, 赵益鑫. 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.
CHEN Zhongda, LIN Zhi, CHEN Xiang, YANG Hongyun, LU Yuanen, ZHAO Yixin. Study on the water inrush mechanism in tunnelling with karst conduits based on nonlinear seepage model[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 149-155.
- [6] 杨坤, 肖维民, 王丽君, 王建, 陈凤辉. 上伏落水洞岩溶隧道围岩力学响应数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(Suppl.2): 637-644.
YANG Kun, XIAO Weimin, WANG Lijun, WANG Jian, CHEN
- Fenghui. Numerical analysis of the mechanical response of karst tunnel surrounding rock considering the influence of sinkhole[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Suppl.2): 637-644.
- [7] 金美海, 刘新荣, 钟祖良. 岩溶隧道拱顶局部水压作用下衬砌受力特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1099-1105, 1131.
JIN Meihai, LIU Xinrong, ZHONG Zuliang. Study on the mechanical characteristics of the lining structure of the karst tunnel under the action of local high water pressure on the vault[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1099-1105, 1131.
- [8] 马栋. 深埋岩溶对隧道安全影响分析及处治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
MA Dong. Study on impact mechanism of deep buried karst to tunnel safety and the treatment technique[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [9] 庄旭峰, 孙东. 实例分析隧道建设对岩溶水的影响[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 681-687.
ZHUANG Xufeng, SUN Dong. Influence of tunnel construction on karst water: Case analyse[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(6): 681-687.
- [10] 许振浩, 李术才, 李利平, 陈军, 张之淦, 石少帅. 一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1396-1404.
XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, CHEN Jun, ZHANG Zhigan, SHI Shaoshuai. Cause, disaster prevention and controlling of a typical kind of water inrush and lining fracturing in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1396-1404.
- [11] 聂志凌. 水压充填型岩溶隧道突水机理及衬砌结构力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
NIE Zhiling. Analysis for water burst mechanism and study on mechanical features of tunnel lining in water filled karst area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [12] 李贻伟. 岩溶公路隧道围岩—支护结构受力特性数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
LI Ywei. Numerical simulation analysis of mechanical characteristics of surrounding rock & support structure of road tunnel in karst region[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [13] 朱海涛. 齐岳山隧道衬砌水压力特征与岩溶处治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
ZHU Haitao. Study on the rule of water pressure upon lining and treatment technique upon Qiyueshan karst[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [14] 王一鸣. 高水压岩溶隧道衬砌结构受力特征和防排水设计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WANG Yiming. Research on mechanical characters and drainage of karst tunnel with high water pressure[D]. Changsha: Central South University, 2014.

- [15] 屈若枫. 武汉地铁穿越区岩溶地面塌陷过程及其对隧道影响特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
QU Ruofeng. Research on the evolutive process of karst collapse and the impact mechanism of the karst on subway tunnel in Wuhan subway crossing area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [16] 谭信荣, 樊浩博, 宋玉香, 刘勇, 杨海宏. 管道型岩溶隧道衬砌结构受力特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1847-1856.
TAN Xinrong, FAN Haobo, SONG Yuxiang, LIU Yong, YANG Haihong. Experimental study on the mechanical characteristics of the lining structure of pipe-type karst tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1847-1856.
- [17] 任一凡. 岩溶洼地隧道衬砌结构安全性数值模拟研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2021.
REN Yifan. Numerical simulation study on safety of tunnel lining structure in karst depression[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2021.
- [18] 余洪章. 瞬时强降雨下铁路岩溶隧道衬砌强度探讨: 以贵州织毕铁路元宝山隧道为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 916-923.
YU Hongzhang. Discussion on lining strength of railway tunnels in karst areas under instantaneous heavy rainfall: An example of the Yuanbaoshan tunnel of Zhipin-Bijie railway in Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 916-923.
- [19] 邹育麟, 何川, 何聪, 张政, 汪波. 重庆岩溶地区季节性富水营运隧道渗漏病害特征及其成因机制分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 18-27.
ZOU Yulin, HE Chuan, HE Cong, ZHANG Zheng, WANG Bo. Analysis of water seepage characteristics and formation mechanisms in seasonal water-rich tunnels in a karst area of Chongqing[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 18-27.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. JTG3370.1-2018公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. JTGT D70-2010公路隧道设计细则[S]. 武汉: 人民交通出版社, 2010.

Simulation analysis of mechanical influence of water level fluctuation in water-eroded groove on tunnel lining

CAI Zhiyan¹, WU Yimin², XU Peng², CHI Zuoqiang³, HUANG Min⁴, WU Haoran², ZHANG Jiawei²

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 3. Shandong Luqiao Group Co., LTD, Jinan, Shandong 250021, China; 4. The Third Construction Co., LTD of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Karst tunnels are usually faced with the risk of water disaster caused by seasonal fluctuation of water level in water-eroded groove. Due to seasonal precipitation, water supply and other reasons, water storage structures such as karst caves and underground rivers are in the state of low water level in the dry season. When the rainy season comes, the groundwater level rises rapidly due to water supply of these water storage structures, and water accumulates behind the tunnel lining through water-eroded groove or karst fissure (karst pore). The water pressure of tunnel lining increases sharply, which seriously threatens the safety of lining structure. Through relevant investigation, the authors learn that a heavy rainfall caused a section of lining to break, and this section had to be repaired during the construction of Yunwushan tunnel on Yiwan railway. Besides, during the construction of Yinshan tunnel in Guizhou Province, a rare rainstorm occurred, and the vertical side wall of the tunnel was crushed by sudden karst water, with the destruction length of the side wall reaching 20 m. Another example is when the construction of Jijiapo tunnel passed through the karst area in Hubei Province, the water pressure behind the lining increased sharply during the heavy rainstorm, which resulted in serious fracturing of the second lining and the bottom plate as well as water gushing due to bottom drum rupture of the construction joint.

Macro influences of karst groundwater on tunnel lining structure have been studied by a large number of scholars through numerical simulation and field test. However, most of them are qualitative analyses insufficient in the study on external water pressure of tunnel lining in karst areas, and do not highlight the distribution characteristics of external water pressure of lining under fluctuating water level of water-eroded groove. Therefore, these studies can hardly reflect the actual influence of karst groundwater on lining structure in terms of the calculation with load-structure method. Based on the engineering case of a highway tunnel in the karst area of Southwest China, this study

quantitatively analyzes, through numerical simulation, the influence of different groundwater levels and different locations of water storage in water-eroded grooves on the stress of tunnel lining. The research process is shown as follows. According to the results of geological exploration and groundwater connectivity test under on-site rainfall conditions, the typical cross-section of the tunnel was firstly selected. Subsequently, the external water pressure of tunnel at different water levels was calculated through seepage software, which was followed by the calculation of the surrounding rock pressure according to the specifications. Finally, the internal force of the lining was calculated through the "load-structure" method. According to the careful analysis and scientific judgment, the occurrence mechanism and evolution characteristics of the tunnel water hazard risk were revealed.

The main conclusions indicate as follows. (1) The water level fluctuates in water-eroded groove under seasonal heavy rainfall, and the pressure of water outside the tunnel changes frequently, which results in significant changes of internal force of tunnel lining. When the water level rises, the structural stress increases and the safety will greatly reduce. The arch and side walls are still loaded in the mode of small eccentric compression, while the mode of loading at the bottom of the tunnel gradually develops from small eccentric compression to large eccentric compression. There exists the risk of cracking and breakage of lining structure at high water level. (2) The water storage of water-eroded groove at the side wall of the tunnel results in bias water load on the tunnel, and the safety factor of the side wall decreases by up to 1.1. The safety factor of tunnel lining at the same water level is less than that of the corresponding position on the other side, with the difference of safety factor between 0.1 and 0.3. With the gradual increase of groundwater level, the difference shows a decreasing trend, i.e. from bias water load to even water load, and the influence on structural force difference gradually reduces. (3) Under the condition of high groundwater level caused by seasonal heavy rainfall, although the tunnel drainage system has played a certain role of pressure relief, the tunnel lining still bears high water pressure. There is a possibility that the structural safety cannot be satisfied, especially at the side wall and the bottom of the tunnel. Therefore, when seasonal heavy rainfall comes, the drainage system should be conducted smoothly. Strengthening drainage and pressure relief is the key to the problem that excessive water pressure caused by water head rise will roughly destroy lining. Besides, the safety of lining structure of side wall and tunnel bottom should be paid close attention to. In this study, the numerical simulation is used to quantitatively analyze the stress response and difference of lining structure under the condition of water level fluctuation in water-eroded groove, so as to provide theoretical support for disaster prevention of karst tunnel.

Key words highway tunnel, mechanical influence, numerical calculation, lining structure, water level fluctuation of water-eroded groove

(编辑 张玲)