

不同水头高度与溶腔尺寸条件下隧道衬砌结构力学特性研究

孙廉忠

(中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 064099)

摘要: 岩溶地区隧道由于地质水文条件复杂, 面临着渗水、突水和排水系统堵塞等风险, 严重威胁隧道安全运营。本文针对富水岩溶区隧道排水系统堵塞问题, 基于 ABAQUS 软件建立数值模型, 研究了不同水头高度与溶腔尺寸条件下隧道衬砌结构的力学特性变化规律。研究表明, 隧道排水量随水头高度和溶腔尺寸的增加显著增长, 排水量增长具有近似线性关系; 衬砌背后水压力随水头高度增加呈线性增加, 且随溶腔尺寸增大而显著增加, 但增长速率逐渐减缓; 衬砌结构应力随水头高度和溶腔尺寸增加而明显提高, 且高水头条件下应力增幅尤为明显; 衬砌位移对水头高度变化敏感性逐渐增强, 溶腔尺寸增大对衬砌位移的影响亦显著, 但随尺寸继续增大, 影响逐渐减弱。最后, 对依托工程提出了一系列加固与优化措施, 有效保障了隧道施工安全。本研究成果为岩溶地区隧道排水系统的优化设计与安全维护提供了理论依据。

关键词: 岩溶隧道; 衬砌结构; 排水堵塞; 力学特性; 水头高度

中图分类号: U451.4

文献标识码: A

Research on the Mechanical Characteristics of Tunnel Lining Structures under Different Water Heads and Karst Cavity Sizes

SUN Lianzhong

(China Railway 18 Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan 064099, Hebei, China)

Abstract: Due to complex geological and hydrological conditions, tunnels in karst regions face significant risks such as water leakage, water inrush, and drainage system blockages, severely threatening tunnel operational safety. Focusing on the drainage system blockage issues in water-rich karst tunnels, this paper established a numerical model based on ABAQUS software to study the mechanical characteristics of tunnel linings under different karst scales. Results show that tunnel drainage volume increases significantly with higher water heads and larger cavity sizes, exhibiting an approximately linear growth; water pressure behind linings increases linearly with water head and significantly rises with cavity size, though at a gradually decreasing rate; lining structural stresses rise notably with increased water head and cavity size, especially under high water head conditions; the sensitivity of lining displacement to water head changes gradually increases, with significant but diminishing impacts as cavity size continues to expand. Finally, a series of reinforcement and optimization strategies are proposed to ensure tunnel construction safety based on the engineering case. This study provides theoretical support for optimizing drainage systems and ensuring safety maintenance of tunnels in karst regions.

Key words: karst tunnel; lining structure; drainage blockage; mechanical characteristics; water head height

在岩溶地区, 可溶性岩石(如石灰岩、白云岩等)在水体溶蚀作用下易形成地下空洞、通道与裂隙等地质构造, 常引发渗水、突水及排水系

统失效等重大安全隐患^[1-2]。水头作为单位重量水体所具有的能量, 通常以水位高度表示, 直接决定地下水压力大小。衬砌是为维持隧道稳定而

收稿日期: 2025-05-12

作者简介: 孙廉忠, 工程师, 本科, 研究方向为隧道施工

构筑的永久性支护体系，一般由初期支护与二次衬砌共同组成，用于承担围岩压力及水荷载。在富水岩溶区，季节性降雨与岩溶含水层的动态变化可能导致地下水位急剧上升，形成高水头压力，从而加剧衬砌结构的受力与变形风险^[3]。若隧道排水系统发生堵塞（如因结晶沉淀、泥沙淤积等原因），其排水能力将显著下降，导致衬砌背后水压力积聚，进而引发结构开裂甚至失稳^[4-6]。此外，溶腔的尺寸与分布也对围岩稳定性和水文环境具有重要影响。因此，在排水系统堵塞的工况下，深入研究不同水头高度与溶腔尺寸对衬砌结构力学性能的作用机制，对保障隧道全寿命周期内的结构安全与服务性能具有重要理论价值与工程指导意义。

当前，已有诸多学者针对岩溶隧道排水堵塞现象开展了大量研究。段海澎等^[7]对岩溶区隧道建设与营运过程中可能面临的灾害风险问题进行了分析，对结晶堵管后可能诱发的衬砌结构安全性问题进行了探讨。李林毅等^[8]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变化规律。徐金华等^[9]采用FLAC3D软件对岩溶段隧道排水系统在不同堵塞率条件下的衬砌结构力学特性进行分析，同时通过建立室内渗流模型试验进一步验证数值模拟结果的合理性。赵东平等^[10]在山岭隧道通用排水设计方案的基础上设计3种改进的排水方案，采用三维数值模拟方法研究3种排水方案条件下隧道衬砌水压分布规律，并对岩溶隧道衬砌水压进行实测。邓昌中等^[11]建立富水区隧道三维流固耦合模型，研究了设置环向排水盲管条件下衬砌水压力分布特征，并引入平均卸压系数来分析环向排水盲管间距对衬砌水压力的影响。罗雄文^[12]针对富水高压山岭隧道排水量和水压力控制问题，建立了平行导洞排水方案的设计计算理论和方法，并开展了对比验证和参数分析以及实际应用研究。Li等^[13]基于有限差分软件建立了流固耦合模型，研究了隧道圆形排水管、横向排水管及管接头处对称与非对称堵塞对围岩孔隙水压力、位移和应力的影响。然而，既有研究多集中于单一因素（如水头高度或溶腔尺寸）的独立作用，往往忽略了排水系统堵塞对衬砌结构力学响应的影响。

基于此，本文以岩溶富水区隧道工程为工程背景，针对其富水岩溶区段衬砌结构渗漏与排水系统堵塞问题，采用ABAQUS软件建立数值模型，系统分析了不同水头高度和溶腔尺寸条件下隧道衬砌结构力学特性的影响规律，并提出针对

性加固与优化措施，为类似工程的设计优化与病害防治提供理论支撑。

1 工程概况

本文研究的隧道位于高原地带的横断山区，海拔较高。隧址区围岩主要由石英砂岩、泥质粉砂岩夹灰岩组成，层理清晰且倾角缓和；岩体完整性中等，地下水赋存条件活跃，属典型富水隧道。地表溪流切割作用明显，溪流流量对季风降雨高度敏感；雨季期间，岩溶含水层因快速补给导致地下水位突升，形成高水头承压环境，显著增加衬砌受荷与变形风险。

ZK32 + 535 溶洞揭露为与承压水系统连通的充水岩溶空腔，具有明显压力水头。该处溶腔深度超过15 m，宽度超过12 m，水文地质条件复杂。鉴于隧道所在岩溶区段受承压水作用明显，且整体地质与水文环境变异较大，本文选取V级围岩典型横断面（ZK32 + 535）作为研究对象，并依据《铁路隧道设计规范》（TB 10003—2016）中关于低完整性围岩的处治原则开展深入分析。

工程采用 $\phi 108 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管棚配合注浆的超前加固方式；初期支护选用270 mm厚的C25湿喷混凝土，并布设系统锚杆及钢筋网，厚度参数与V级围岩推荐范围保持一致。二次衬砌浇筑650 mm模筑钢筋混凝土以满足高水压力与长期耐久性要求。排水系统由横向排水管（ $\phi 150 \text{ mm}$ ）、纵向盲管（ $\phi 100 \text{ mm}$ ）、环向盲管（ $\phi 50 \text{ mm}$ ）等组成。隧道结构与排水系统如图1所示。

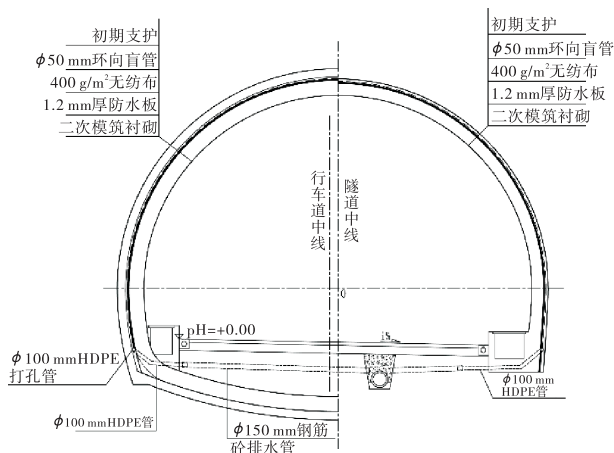


图1 隧道排水系统设计图

隧道施工完成初期支护后，渗漏水位置出现明显结晶沉淀现象，且该沉淀物逐步在排水系统中发生堵塞^[14]。因此，本文选取该富水岩溶隧道工程作为研究对象，研究不同水头高度与溶腔尺

寸条件下，隧道衬砌结构力学特性变化规律。

2 数值模拟

2.1 模型建立

本文采用 ABAQUS 软件开展分析工作。针对富水溶区段（埋深约 150 m），在隧道周围布置 5 m 厚的注浆加固圈；为最大程度降低边界效应，模型侧边界与隧道轴线的距离保持 5 倍洞径，纵向长度取 50 m；隧道纵坡设为 2%。为兼顾计算精度与效率，将拱顶与模型顶部的距离控制在 50 m，其上方剩余 100 m 覆土以等效土压形式加载于模型顶面。

溶腔腔体采用孔隙率 99% 的近饱和介质模拟（即 99% 体积为水），并通过提高渗透系数来模拟其与岩溶通道的水力连通。为凸显工程设计中的最不利工况，将现场勘察发现的两处间距约 3 m 的溶腔合并，简化为位于同一断面的圆柱体，并假定溶腔与隧道开挖轮廓直接接触，以模拟隧道衬砌直接暴露于溶腔水体的极端情况。实际工程中，溶腔形态通常较为不规则，尺寸可能更大（勘测深度超过 15 m、宽度超过 12 m），本文选用直径 3 m、长度 20 m 的圆柱体溶腔作为基准模

型，以在计算规模和分析精度之间取得有效平衡。

隧道实际排水设施包括环向盲管（常规布置间距为 6 m，富水及溶腔段加密至 3 m）与纵向排水沟（隧道两侧各布置 2 条 $\phi 150$ mm 横向排水管，间距为 12 m）。在数值模型中，采用沿隧道纵向布置的高渗透性介质单元，等效模拟排水管道的导流作用。在溶腔附近隧道两侧各设置一组孔隙率为 99%、渗透系数为 6.8×10^{-2} m/s 的“隧道排水管”单元，以表征几乎无阻滞的高效排水通道。鉴于排水管材自身刚度较低，对结构承载贡献极小，为保证数值计算的稳定性，在模型中将排水管单元的弹性模量设为与混凝土衬砌相同（32.93 GPa），这一取值虽远高于实际工程中 HDPE 或 PVC 材质排水管的刚度，但对衬砌结构受力的影响可忽略不计。

所有构件均采用实体单元离散。围岩及注浆圈选用摩尔-库仑本构关系，复合衬砌按弹性本构模型处理；二次衬砌设为不透水的三维应力单元，其余部件则采用各向同性渗流单元。如图 2 所示，通过开展渗流试验、直剪试验及抗压试验，能够准确获取数值模拟过程中所需的各类材料的物理参数。具体参数数值如表 1 所示。

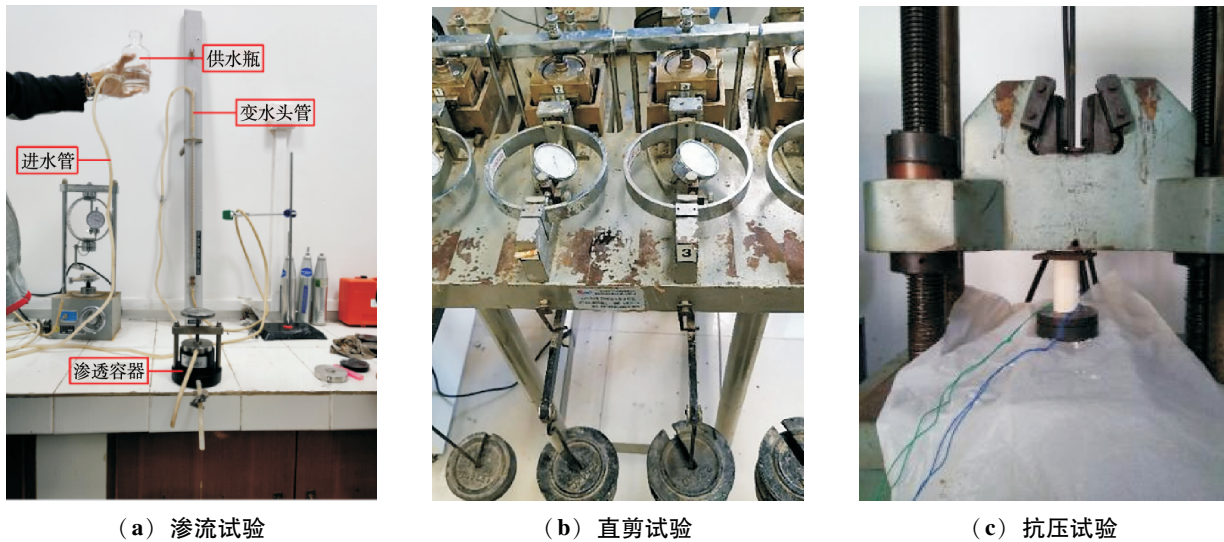


图 2 室内先行试验

表 1 数值计算材料参数表

| 材料 | 密度/ (g/cm ³) | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 内摩擦角/ (°) | 黏聚力/ MPa | 孔隙率/% | 渗透系数/ (m/s) |
|-------|-----------------------------|--------------|------|--------------|-------------|-------|----------------------|
| 隧道围岩 | 2.41 | 9.92 | 0.24 | 36.9 | 2.14 | 22 | 3.3×10^{-6} |
| 注浆区域 | 2.46 | 13.28 | 0.24 | 35.1 | 3.11 | 16 | 4.2×10^{-7} |
| 溶腔腔体 | 2.19 | 10.42 | 0.24 | — | — | 99 | 5.1×10^{-2} |
| 初期支护 | 2.16 | 29.37 | 0.23 | — | — | 23 | 1.3×10^{-8} |
| 二次衬砌 | 2.43 | 32.93 | 0.16 | — | — | — | — |
| 隧道排水管 | 2.41 | 32.93 | 0.20 | — | — | 99 | 6.8×10^{-2} |
| 堵塞区域 | 2.24 | 9.82 | 0.24 | — | — | 22 | 3.1×10^{-8} |

2.2 边界条件及工况设计

在力学分析方面,向模型四侧施加水平位移约束以抑制侧向刚体运动,底面则采用全固定条件以避免竖向与水平位移。在渗流场中,将外边界视为不透水面;针对不同水头工况,在模型内部设置相应的初始水位并保持其恒定,同时将泄水孔处的孔隙水压力设定为0,整个渗流过程遵循 Darcy 定律。针对溶腔,两处溶腔纵向间距仅 3 m。考虑到现场超挖与隧道-溶腔的实际接触关系,计算中将二者统一布置于同一里程位置,以捕捉最不利相互作用。

为评估水头高度与溶腔尺寸对衬砌受力的综合影响,本研究以纵向堵塞率 20%、横向堵塞率 80% 的监测工况作为基准,即排水管中堵塞物长度占总的排水管长度的 20%、堵塞物横截面积占排水管横截面积的 80%。基于此,通过调整溶腔孔隙水压力与溶腔直径,构建多组组合工况,相关模型示意图见图 3,详细工况参数列于表 2。其中用 W 表示水头高度工况, D 表示溶腔横截面直径工况。

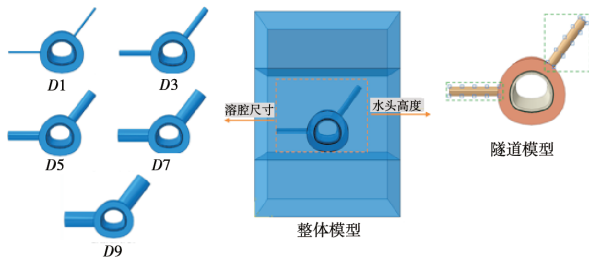


图 3 不同工况计算模型图

表 2 模型设计工况表

| 堵塞因素 | 工况参数 |
|---------------|---------------------|
| 纵向堵塞率/% | 20 |
| 横向堵塞率/% | 80 |
| 水头高度 W/m | 100、150、200、250、300 |
| 溶腔横截面直径 D/m | 1、3、5、7、9 |

2.3 模型假设与适用范围

为了保证数值模拟的可操作性和计算效率,在上述模型构建过程中进行了若干简化和假设,现对模拟方案的局限性进行补充说明。

(1) 溶腔形态假设:实际溶腔往往形态复杂且不规则,现场勘察结果亦显示不同溶腔之间存在一定距离。模拟方案中将两个相距约 3 m 的溶腔合并并简化为直径为 3 m、长度为 20 m 的圆柱形腔体,溶腔与隧道轮廓直接接触,假设其孔隙率为 99%、充满水体。这一处理反映了隧道受溶腔作用的最不利工况,忽略了溶腔不规则性和多

腔串联等因素可能引起的局部应力差异。

(2) 排水系统简化:模型将环向盲管、纵向排水沟等排水设施等效为高渗透性介质单元,设置与混凝土衬砌相同的弹性模量以保证数值稳定。由于排水管道采用 PE 或 PVC 等低模量材料,上述等效处理会导致排水管的刚度被高估;但鉴于排水设施主要承担导流功能,对衬砌承载的贡献较小,因此其整体受力的影响有限。

(3) 材料参数与本构关系:围岩、注浆圈及衬砌材料参数主要来源于直剪试验、渗流试验和抗压试验,并假定材料各向同性,忽略了天然岩体可能存在的节理、层理及渗透系数空间分异。由于工程区段长期处于静水压力作用下,计算采用弹性或摩尔-库仑模型,未考虑 creep 以及支护材料长期老化等效应。

(4) 边界条件:模型侧向边界与模型顶面距隧道轮廓 5 倍洞径并施加位移约束,溶腔水头在工况分析中假定为恒定水位,未考虑降雨、季节变化等导致的渗流场时变特性。

综上,本研究模拟结果能够反映排水系统堵塞条件下水头和溶腔尺寸对衬砌结构力学响应的总体趋势,但由于溶腔形态、材料参数、边界条件等存在一定简化,计算值可能与实际工程存在差异。后续研究可通过建立更复杂的多腔模型、引入各向异性本构关系及考虑水压随时间变化的渗流-力学耦合等进一步提升模拟精度,并结合现场监测数据对数值模型进行校准。

3 计算结果分析

3.1 隧道排水量

3.1.1 不同水头高度条件下隧道排水量

表 3 为不同水头高度下的隧道日排水量。结果表明,工况 $W100 \sim W300$ 的排水量均随水头升高而同步增加,并呈显著正相关。典型区间内排水量的增幅随水头抬升呈现快速且稳定的上升态势。

表 3 不同水头高度下的隧道排水量

| 工况 | 排水量/ (m^3/d) |
|------|----------------|
| W100 | 429.12 |
| W150 | 585.32 |
| W200 | 738.45 |
| W250 | 892.17 |
| W300 | 1047.82 |

图 4 给出了排水量-水头关系曲线及相邻 50 m 水头区段的排水量增量。由图可知,各 50 m 区段的日排水量增量几乎一致(约 $155 m^3/d$),对

应曲线平均斜率近似为 $2.97 \text{ (m}^3/\text{d) / m}$, 表明在所研究水头范围内, 排水量与水头高度之间近似保持线性比例关系。

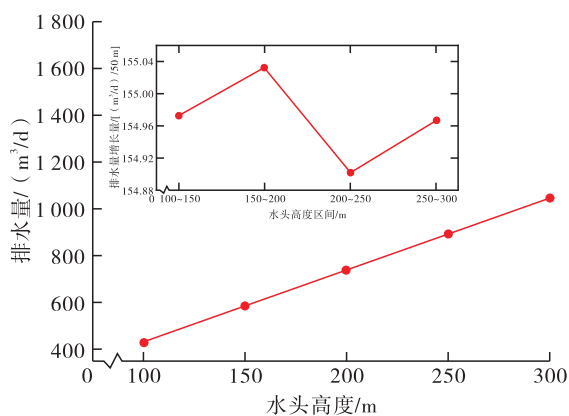


图4 隧道排水量随水头高度变化曲线

3.1.2 不同溶腔条件下隧道排水量

表4 汇总了工况 D1 ~ D9 的日排水量数据, 结果显示排水量随溶腔横截面直径增大而单调上升, 两变量之间呈现明显正相关。为进一步阐明这一趋势, 本节对排水量 - 溶腔尺寸响应规律进行定量分析。

表4 不同溶腔横截面尺寸的隧道排水量

| 工况 | 排水量/ (m ³ /d) |
|----|--------------------------|
| D1 | 471.23 |
| D3 | 587.62 |
| D5 | 663.41 |
| D7 | 729.96 |
| D9 | 793.82 |

图5 为排水量随溶腔直径变化的总体曲线及相邻尺寸区段的排水增量。可以发现, 在堵塞条件下, 当溶腔直径由 1 m 扩大至 9 m 时, 隧道排水量累计提升 68.5%, 表明溶腔尺寸是影响渗流通量的主控因素之一。随着溶腔直径持续增大, 增量曲线的斜率逐步减小, 说明排水量对溶腔尺寸的边际敏感性持续下降。出现上述“递减增长”现象的根本原因在于排水系统正逼近其极限泄水能力。换言之, 当溶腔进一步扩大时, 排水量已不仅受溶腔截面控制, 还受制于隧道排水设施的最大通流能力^[15]。

3.2 衬砌背后水压力

3.2.1 不同水头高度条件下衬砌背后水压力

图6 展示了不同工况下, 风险控制测点处衬砌背后水压力对水头升高的响应规律。结果表明, 隧道拱底位置的背后水压力与水头高度呈显著正相关: 当水头每升高一个区间时, 衬砌背后水压力的增量基本保持一致 (约 0.397 MPa)。

因此, 在研究范围内, 可将衬砌背后水压力近似视作随水头线性增长的函数。

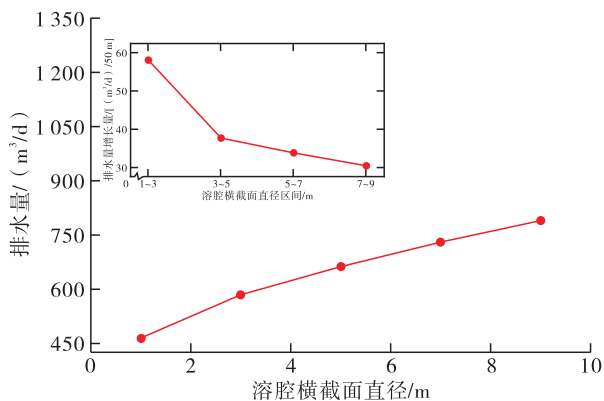


图5 隧道排水量随溶腔尺寸变化曲线

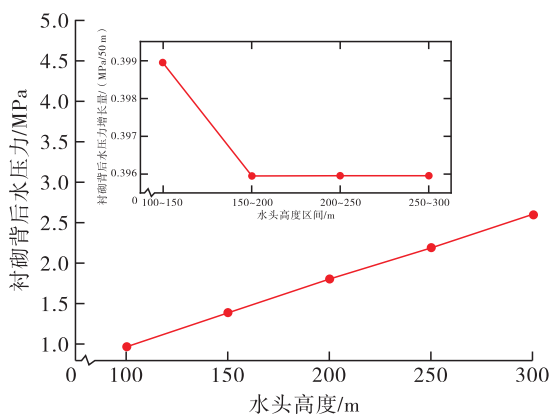


图6 隧道衬砌背后水压力随水头高度变化曲线

3.2.2 不同溶腔条件下衬砌背后水压力

图7 给出了各工况下衬砌背后水压力随溶腔横截面直径变化的响应曲线。结果显示: 随着溶腔直径增大, 衬砌背后水压力总体呈上升趋势, 但增幅逐步递减, 说明溶腔尺寸对水压力的影响正逐渐减弱。进一步结合图8 的水压力云图可见, 增大溶腔截面不仅提高了局部衬砌背后水压力峰值, 还显著扩大了压力传递的纵向影响范围; 溶腔越大, 其对衬砌背后水压力分布的扰动区域亦越大。

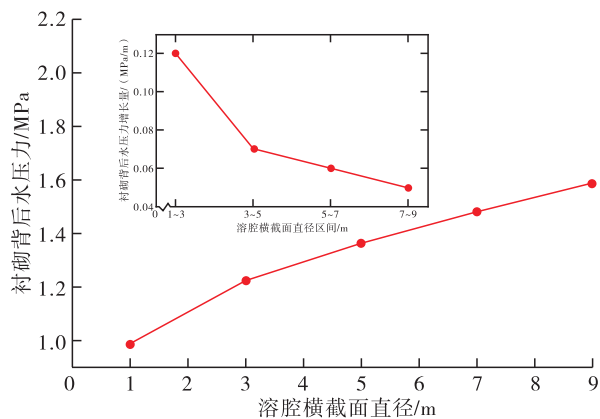


图7 衬砌背后水压力随溶腔横截面尺寸变化曲线

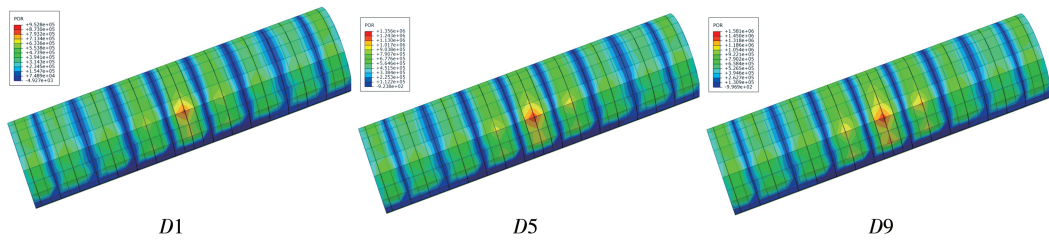


图 8 不同溶腔尺寸下衬砌背后水压力云图 (单位: Pa)

3.3 衬砌结构应力演变规律

3.3.1 不同水头高度条件下衬砌结构应力

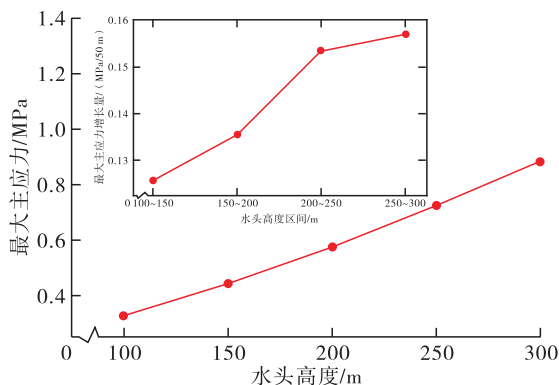
图 9 揭示了风险控制点处衬砌应力随水头变化的响应规律。总体来看, 工况 W100 ~ W300 的应力值与水头高度呈正相关, 而且其增速随水头抬升而加快。具体表现如下:

最大主应力方面, 右拱肩处的最大主应力随水头升高呈加速增长特征; 各相邻水头区间的应力增量逐级扩大, 对应曲线斜率持续增大, 反映出高水头对结构压应力的放大效应。

最小主应力方面, 当水头位于 100 ~ 250 m 区间时, 左拱腰的最小主应力增量近乎恒定, 曲线斜率基本保持不变, 可视为与水头高度近似线性相关。水头超过 250 m 后, 最小主应力的增长速率明显提升, 说明高水头下堵塞工况对衬砌拉应力的影响显著增强。为避免应力突增带来的结构风险, 建议在水头快速抬升阶段前, 及时疏通或修复盲管。

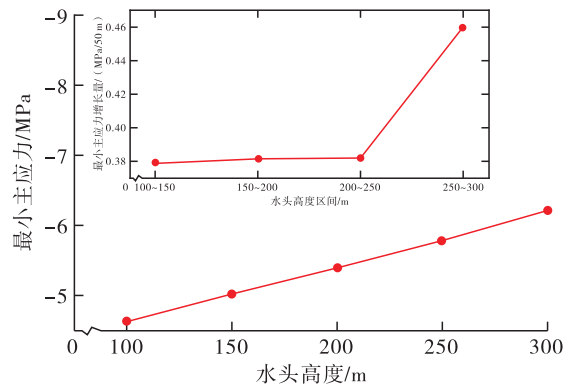
3.3.2 不同溶腔尺寸条件下衬砌结构应力

图 10 揭示了不同溶腔截面尺寸 (D1 ~ D9) 条件下隧道衬砌主应力的响应曲线。结果表明, 主应力随溶腔直径增大总体上呈正向变化趋势; 而最大主应力与最小主应力的变化幅度及规律基本一致。为突出特征, 下文重点剖析最小主应力的响应机制。



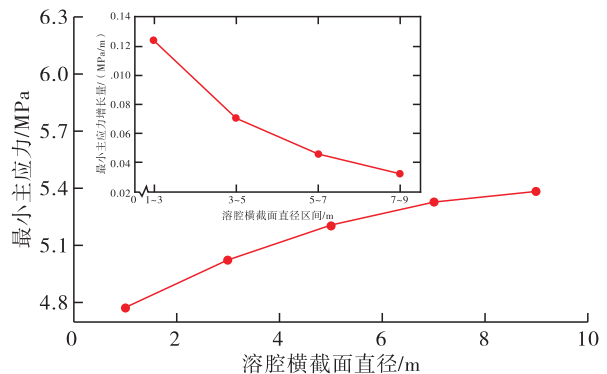
(a) 最大主应力变化曲线

图 9 隧道应力随水头高度变化曲线图

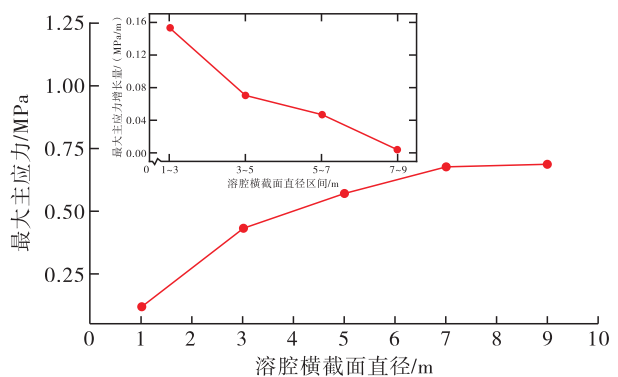


(b) 最小主应力变化曲线

图 9 隧道应力随水头高度变化曲线图 (续)



(a) 最小主应力变化曲线



(b) 最大主应力变化曲线

图 10 主应力随溶腔横截面尺寸变化曲线图

图 11 给出了最小主应力分布云图。由图可知, 在典型堵塞工况下, 溶腔直径从 1 m 扩大至 9 m 时, 衬砌最小主应力累计提升约 11.7%, 说

明溶腔尺寸对拉应力具有显著放大作用。尽管随着直径增大, 最小主应力持续上升, 但其增幅逐渐收敛, 这表明尺寸效应的边际影响正逐步减弱。随着溶腔截面放大, 压力扰动区在里程方向上显著拉长; 直径越大, 受溶腔控制的左拱腰应

力峰值区域越广, 需在设计中综合考虑排水与加固措施。因此, 溶腔规模对衬砌拉应力的放大效应不容忽视, 但其影响呈现“增幅递减”特征。在大尺度溶腔段, 应通过提高排水效率或加强局部支护, 削弱高应力集中带来的结构风险。

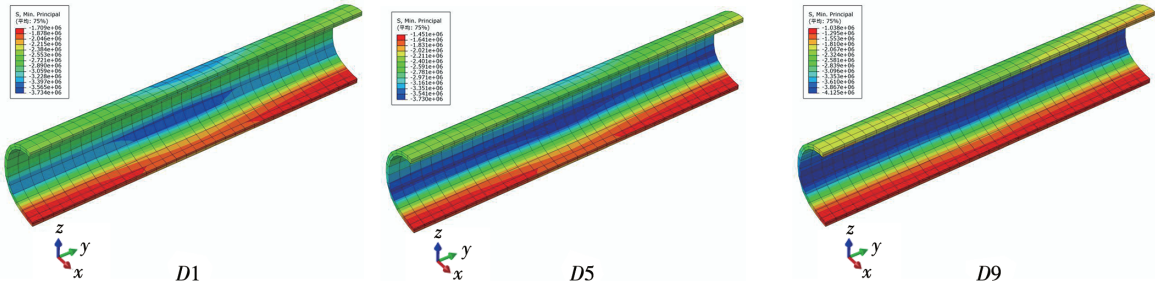


图 11 不同溶腔尺寸下衬砌最小主应力云图 (单位: Pa)

3.4 衬砌结构位移演变规律

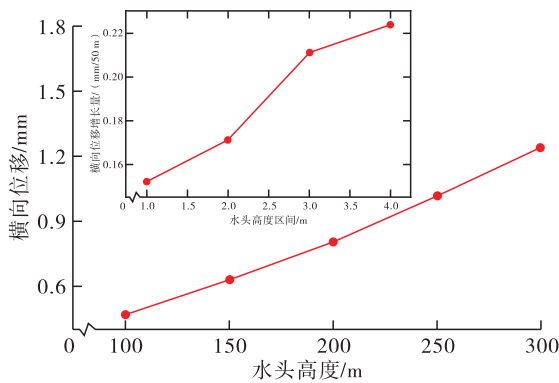
3.4.1 不同水头高度条件下衬砌结构位移

图 12 展示了风险控制点位在不同水头条件 (W100 ~ W300) 下的位移响应。如图所示, 无论左拱腰的横向位移还是右拱肩的竖向位移, 均随水头升高单调递增, 二者与水头高度保持显著正相关。在各相邻水头区段内, 位移增幅呈逐段放大态势, 导致位移 - 水头关系曲线的斜率不断增

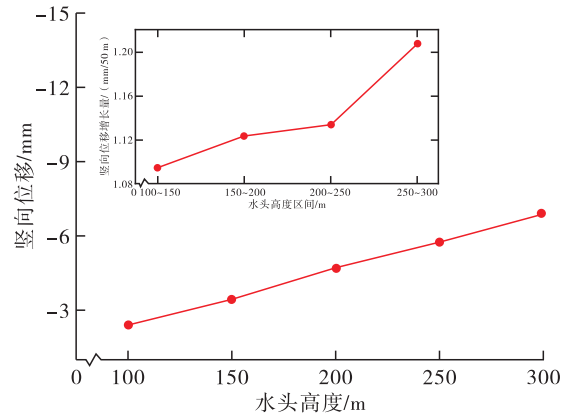
大。曲线斜率的持续增大表明, 随着水头抬升, 衬砌变形对水压变化的敏感性显著增强, 应在高水头阶段重点关注位移发展, 及时采取减压措施。

3.4.2 不同溶腔尺寸条件下衬砌结构位移

图 13 揭示了工况 D1 ~ D9 下风险控制点位位移对溶腔截面尺寸的响应规律。由图可知, 无论横向还是竖向位移, 均随溶腔直径增大而同步上升, 但其增速表现出明显的边际递减特征。

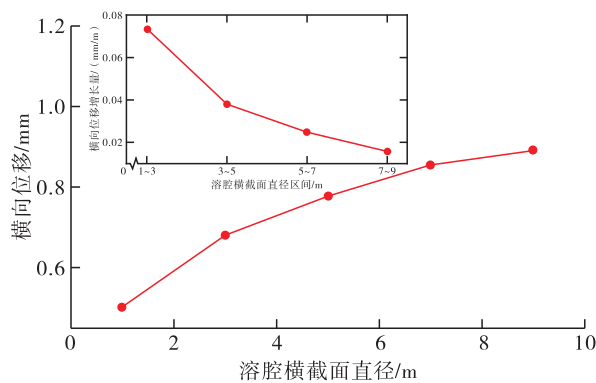


(a) 横向位移变化曲线

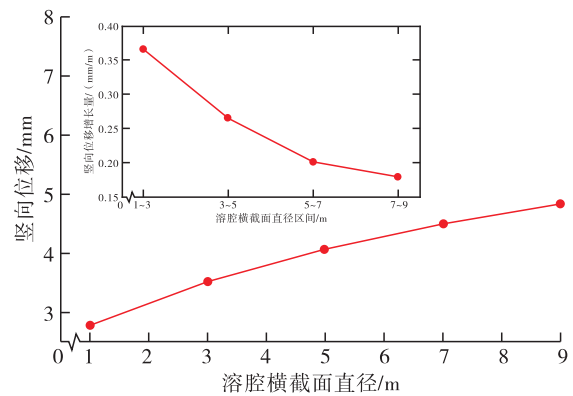


(b) 竖向位移变化曲线

图 12 隧道位移随水头高度变化曲线图



(a) 横向位移变化曲线



(b) 竖向位移变化曲线

图 13 隧道位移随溶腔横截面尺寸变化曲线图

在典型堵塞条件下,左拱腰横向位移溶腔直径由1 m增至9 m时累计提升63.1%。然而,分段增量逐步缩小,曲线斜率呈收敛趋势,表明溶腔尺寸对横向变形的放大作用正在减弱。图14

进一步说明截面放大不仅抬高位移峰值,也扩大了位移影响的纵向范围,溶腔越大,扰动区越长。

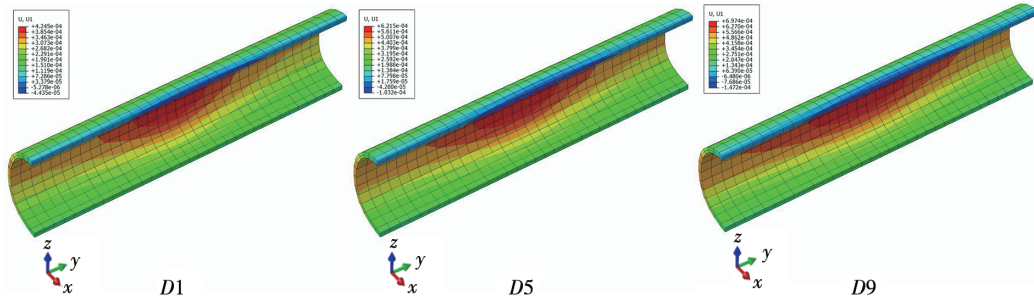


图14 不同溶腔尺寸下衬砌横向位移云图(单位:m)

右拱肩竖向位移随溶腔直径增加亦呈单调上升;直径从1 m扩大至9 m时,竖向位移总增幅为27.1%。与横向位移相似,各区段增量逐渐降低,说明尺寸效应的边际贡献同样减弱。图15的位移云图表明,溶腔放大后竖向位移峰值上移,同时纵向影响带亦相应延伸。为此,溶腔尺

度仍是控制衬砌位移的主要因素,但当直径达到一定阈值后,排水与支护体系的刚度开始主导变形行为,导致位移增幅趋于饱和。因此,在大尺寸溶腔段应兼顾排水效率与二次加固方案,以抑制过大位移并确保结构安全。

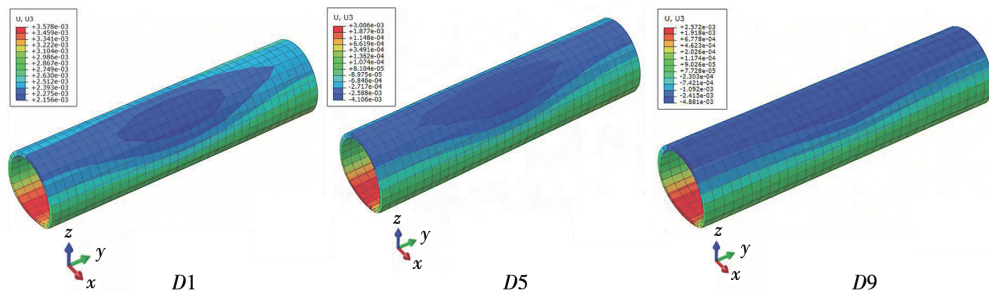


图15 不同溶腔尺寸下衬砌竖向位移云图(单位:m)

4 工程措施

根据上述计算结果,针对高风险工况(如高水头、大溶腔尺寸),提出如下隧道衬砌结构的加固与优化设计建议:

(1) 增强初期支护强度。数值计算结果表明,随着水头高度和溶腔尺寸的增加,衬砌结构的应力和位移显著增加。因此,在高风险区域,建议增加初期支护混凝土厚度,由原来的270 mm提升至300~350 mm,同时提高混凝土等级至C30或更高,并适当加密钢筋网布局,以增强结构承载能力及抗变形性能。

(2) 加强注浆加固措施。在大尺寸溶腔区域,应适当增加注浆加固圈厚度,由原设计的5 m增加至6~8 m,采用高压注浆技术进一步提高围岩稳定性,有效降低衬砌背后水压力的影响。

(3) 优化排水系统设计。数值计算结果表明,排水系统的堵塞会显著提升衬砌背后水压力并影响结构安全。在高风险条件下,应增加纵横向排水管管的布置密度或直径(如将横向排水管直径由150 mm增加至200 mm),提高排水系统的泄水能力,防止高水压积聚。

(4) 采用加强型二次衬砌设计。通过数值计算结果可知,二次衬砌的厚度与混凝土强度等级显著影响结构的抗变形性能。在高风险区段,建议二次衬砌厚度从原650 mm增加至750~800 mm,并采用更高等级的混凝土,并在关键位置增设钢筋环带,以有效抑制裂缝扩展,提高结构耐久性。

(5) 局部特殊支护措施。根据试验中高水头(超过250 m)和大溶腔尺寸(超过7 m)条件下的结构响应规律,建议在拱顶和侧墙设置锚索或

型钢拱架作为局部特殊支护措施,进一步提高衬砌结构的整体稳定性与抗变形能力。

结合本次研究的工程实例(ZK32+535断面),该区域溶腔深度超过15m,宽度超过12m,综合采取以上加固与优化设计措施,保障了施工过程中隧道安全。因此,对于类似工程,应进一步细化上述措施,包括优化钢管棚间距、合理选取注浆参数、加强局部钢筋网布局等措施,以确保隧道衬砌在高风险工况下的长期安全与稳定。

5 结论

本文通过数值模拟系统研究了不同水头高度与溶腔尺寸条件下隧道排水系统堵塞对衬砌结构力学特性的影响,获得如下结论:

(1) 隧道排水量随水头高度和溶腔横截面尺寸增加均呈现明显增长趋势。水头每增加50m,排水量增加约 $155\text{ m}^3/\text{d}$,显示出近似线性关系;而溶腔尺寸的增大会显著提高排水量,但当尺寸较大时,排水系统接近其最大泄水能力,增幅逐渐减小。

(2) 衬砌背后水压力与水头高度呈线性正相关,水头每增加50m,衬砌背后水压力增长约0.397MPa。同时,溶腔横截面尺寸增大也显著提高了衬砌背后水压力,但其增长速率逐渐降低,且溶腔的尺寸扩大了水压力的纵向影响范围。

(3) 衬砌结构应力随水头高度和溶腔尺寸增加而增大。水头高度较低时,最小主应力增长较为稳定,但超过250m后,增幅明显加速,需及时处置排水堵塞问题,以防结构安全风险;同时,溶腔尺寸的增加亦明显提升了衬砌主应力,但影响随尺寸的继续增大而逐渐减弱。

(4) 衬砌位移随水头高度增加表现出显著的加速增长趋势,位移对水头变化的敏感性逐渐增强。溶腔横截面尺寸的增加同样使得衬砌横向与竖向位移显著增大,但随着溶腔尺寸的继续增大,其影响逐渐减弱。

(5) 基于数值计算结果,从增强初期支护强度、加强注浆加固措施、优化排水系统设计、采用加强型二次衬砌设计、局部特殊支护措施等方面提出一系列的加固与优化措施,保障了施工过

程中的隧道安全。

参考文献:

- [1]李鹏云.岩溶区隧道“漏、降、渗、塌”水环境灾变机理与防控体系构建[J].铁道建筑技术,2025(5):153-157.
- [2]张浩楠,刘禹阳,田威,等.公路隧道排水系统结构病害分类及适用性检测分析[J].现代隧道技术,2024,61(5):243-251.
- [3]曹萍.暴雨时岩溶隧道排水方案优化分析[J].西部交通科技,2024(8):123-125.
- [4]龙杰,胡鸿川,李磊,等.岩溶地区隧道排水系统结晶及处治技术现状分析[J].公路交通科技,2023,40(5):162-169.
- [5]郭小雄.铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J].中国铁道科学,2020,41(1):71-77.
- [6]叶飞,田崇明,何彪,等.在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J].中国公路学报,2021,34(3):159-170.
- [7]段海澎,陈发根,姚春江,等.岩溶区隧道结晶堵管现象及其诱发的风险问题浅析[J].土木工程学报,2020,53(S1):332-335.
- [8]李林毅,阳军生,高超,等.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[J].岩土工程学报,2021,43(4):715-724.
- [9]徐金华,周华求,熊文威,等.岩溶隧道排水系统不同堵塞条件下衬砌结构力学特性[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(1):91-104.
- [10]赵东平,和琦,杜卿,等.基于水压特征的岩溶隧道排水方案研究[J].现代隧道技术,2024,61(6):162-171,208.
- [11]邓昌中,朱开茂,李威,等.环向排水盲管间距对富水区隧道衬砌水压力的影响[J].黑龙江交通科技,2025,48(1):87-92.
- [12]罗雄文.隧道排水量-水压力控制与平行导洞排水方案设计计算方法研究[D].北京:北京交通大学,2024.
- [13]LI Y, LIU S, GUAN S, et al. Numerical analysis of the blockage effect of the tunnel drainage system on the e-han expressway[J]. Processes, 2023, 11(3):949.
- [14]郭小雄,马伟斌,罗驰,等.铁路隧道防排水系统主要问题及性能保障措施[J].隧道建设(中英文),2024,44(12):2424-2441.
- [15]周定坤.强降雨条件下岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.