文章编号:1008-1542(2025)02-0225-12

# 富水区隧道衬砌水压力分布特征及排水系统降压能力研究

陈信朋[1],王朝熠[1],卢　锋[2],李林隆[2],赵飞龙[1],
熊　成[1],罗崇俊[1],马凯蒙[3]

(1. 广西路建工程集团有限公司,广西南宁　530001;
2. 西华大学应急管理学院,四川成都　610039;
3. 石家庄铁道大学土木工程学院,河北石家庄　050043)

**摘　要**:为研究富水区隧道排水系统的降压能力,以贺州至巴马高速公路(来宾至都安段)凤凰二号隧道工程为依托,通过 FLAC3D 软件建立三维流固耦合数值模型,提出了一种新的排水系统降压能力综合评价方法,探究了环向排水盲管间距、围岩与初支渗透系数比和水头高度 3 种影响因素对降压能力的影响规律。结果表明:环向盲管对衬砌拱圈水压力有显著降低作用,衬砌拱圈、边墙部位水压力较大,仅次于仰拱;盲管间距在 3～5 m 范围内,衬砌拱顶水压沿隧道纵向变化特征呈现“M”型变化趋势,但盲管间距大于 5 m 时,盲管降压效果开始显著下降,水压沿隧道纵向变化特征转变为“平顶山”状;以综合受力指数、降压系数评价排水系统的降压能力,得到了排水系统降压能力预测公式,最大预测误差为 8.25%,具有较高精度;3 种因素对降压能力的影响大小顺序为环向盲管间距＞围岩与初支渗透系数比＞水头高度;若围岩与初支渗透系数比过大,排水系统降压效能将出现下降,可采取缩小盲管间距或对围岩进行注浆加固以增加排水系统降压效能;综合考虑多因素与降压能力变化规律、结构安全性与成本效益,将工程环向盲管间距设为 5 m 较为合适。所提排水系统降压能力综合评价方法适用性较好,可为富水区隧道工程防排水体系的设计施工提供参考。

**关键词**:隧道工程;富水隧道;环向排水盲管间距;渗透系数比;水头高度;降压能力评价

**中图分类号**:U455.49　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2025yx02012

收稿日期:2024-10-12;修回日期:2024-12-31;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(52408440);广西路建工程集团有限公司委托课题(222300,222302)
第一作者简介:陈信朋(1984—),男,广西桂平人,工程师,主要从事隧道工程施工与管理方面的研究。
通信作者:卢锋,副教授。E-mail:fenglu0901@foxmail.com

陈信朋,王朝熠,卢锋,等.富水区隧道衬砌水压力分布特征及排水系统降压能力研究[J].河北科技大学学报,2025,46(2):225-236.
CHEN Xinpeng, WANG Chaoyi, LU Feng, et al. Study on the water pressure distribution characteristics of tunnel lining and pressure-reducing capability of the drainage system in water-rich areas[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(2):225-236.

# Study on the water pressure distribution characteristics of tunnel lining and pressure-reducing capability of the drainage system in water-rich areas

CHEN Xinpeng[1], WANG Chaoyi[1], LU Feng[2], LI Linlong[2], ZHAO Feilong[1], XIONG Cheng[1], LUO Chongjun[1], MA Kaimeng[3]

(1. Guangxi Road Construction Engineering Group Company Limited, Nanning, Guangxi 530001, China;
2. School of Emergency Management, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China;
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract**: In order to study the pressure-reducing capacity of the tunnel drainage system in the water-rich areas, a three-dimensional fluid solid coupling numerical model was established using FLAC3D software based on the Fenghuang No. 2 tunnel of the Hezhou Bama Expressway (Laibin to Du'an section). A new comprehensive evaluation method for the pressure-reducing capacity of drainage system was proposed to investigate the influence of three factors including the distance between circumferential drainage blind pipes, the ratio of permeability coefficient between surrounding rock and initial support, and the height of water head on the pressure-reducing capacity. The results show that the circumferential blind pipe has a significant reducing effect on the water pressure of the lining arch ring. The water pressure at the lining arch and side wall is relatively high, only lower than that of the inverted arch. When the distance of the blind pipes is 3～5 m, the water pressure at the top of the lining along the longitudinal direction of the tunnel exhibits an "M" shaped variation trend. However, when the distance of the blind pipes exceeds 5 m, the pressure reduction effect of the blind pipes begins to significantly decrease, and the variation characteristic of water pressure along the longitudinal direction of the tunnel changes to a "flat-topped mountain" shape. The pressure-reducing capacity of drainage system was evaluated by comprehensive stress index and pressure reduction coefficient, obtaining a prediction formula for the system pressure-reducing capacity. The maximum prediction error is 8.25%, indicating a high level of accuracy. The impact of the three factors on the pressure-reducing capacity is in the following order: the distance between circumferential blind pipes > the ratio of permeability coefficient between surrounding rock and initial support > the height of water head. The larger the ratio of surrounding rock to initial support permeability coefficient is, the lower the pressure-reducing efficiency of the drainage system is. It is necessary to reduce the distance between blind pipes or reinforcing the surrounding rock with grouting to increase the pressure-reducing efficiency of the drainage system. Taking into account multiple factors and the variation pattern of pressure-reducing capacity, construction period, and cost, it is suggested to set the distance between circumferential blind pipes at 5 m for this project. The proposed comprehensive evaluation method for the pressure-reducing capacity of the drainage system demonstrates good applicability, providing significant reference for the design and construction of the waterproof and drainage system of the water-rich tunnel.

**Keywords**: tunnel engineering; water-rich tunnel; distance between circumferential drainage blind pipes; permeability coefficient ratio; height of water head; evaluation of pressure-reducing capacity

地下水作用是导致富水区岩溶隧道病害频发的主要因素[1]。地下水压不仅会对隧道施工造成安全隐患,更会导致隧道运营期间产生渗漏水、仰拱隆起和涌水灾害[2],甚至造成隧道衬砌局部破坏[3]。如圆梁山隧道[4-5]、齐岳山隧道[6-8]、高家坪岩溶隧道[9]等隧道修建中均有地下水灾害发生。因此,研究隧道衬砌水压分布特征及其影响规律是隧道防排水设计的必要需求。

一般隧道建设中的地下水处置技术主要遵循“严堵＋畅排”[10]、“刚柔相济,因地制宜,综合治理”[11]的原则,但对于富水隧道而言,常规防排水设置已略显不足。目前,已有众多学者通过数值模拟、现场试验等方法对防排水设置参数进行研究,包括对环向盲管间距、注浆圈参数、放排水垫层规格等的设置,以求合理设置

防排水系统，达到最好的效果[1, 12-16]。这些研究对于常规排水有一定的改良，但是仍无法解决富水地层隧道、复杂地质隧道等排水问题。因此，一些学者对新型防排水体系开展了系列研究。LIU 等[17]分析贵阳市轨道交通线行车隧道施工过程中大断面岩溶导管突水危害及处理的案例，提出了建造由排水井和连接通道组成的排水通道，使承压岩溶水自行流向地表的创新方案，用于处治突水和突泥；李鹏飞等[18]采用“堵水限排”的设计理念，设计海底隧道衬砌结构排水系统；JANG 等[19]将新型土工复合材料用于隧道排水层；王秀英等[20]对于海底隧道的渗水问题，以国外已建成海底隧道经验为基础，提出确定海底隧道防排水原则的临界地下水位，并采用数值分析研究建立新的防排水体系。

综上所述，针对富水区隧道防排水结构以及衬砌水压力分布已有大量研究，但少有学者深入研究隧道排水系统降压能力的综合评价方法及多因素变化对排水系统降压能力的影响规律。如何评价排水系统的降压能力已成为排水系统设计施工的关键问题。本文以贺州至巴马高速公路（来宾至都安段）凤凰二号隧道为工程依托，基于流固耦合理论建立三维有限差分模型，研究隧道排水系统施作下的水压力分布特征，提出了一种排水系统降压能力的综合评价方法，揭示水头高度、环形盲管间距、围岩与初支渗透系数比对隧道排水系统降压能力的影响规律，并在此基础上确定了环形盲管的最优间距。

## 1　依托工程概况

贺州至巴马高速公路（来宾至都安段）凤凰二号隧道位于广西省来宾县良塘镇，隧道走向约为 50°，为双线单洞隧道。隧址区岩溶强发育，地表较多洼地，地下水丰富，以股状或涌流状为主。根据地勘及施工期实测数据显示，水头最高约 50 m。围岩为中风化灰色中厚-厚层状灰岩，稳定性差。当地气象资料显示，来宾县雨季在 4 月—8 月，降雨量约占全年的 70%，历史年平均降雨量最大达 1 903.0 mm，与最少年平均降雨量相差 1 081.7 mm。

隧道采用仰拱型衬砌结构，初支厚度为 23 cm，采用 C25 喷射混凝土；二衬厚度为 40 cm，采用 C35 混凝土，隧道断面如图 1 所示。隧道排水系统由环、纵、横向排水盲管以及中心排水管组成。其中环向盲管采用 $\Phi$50 mm 双壁打孔波纹管，拟沿隧道纵向间距 10 m 设 1 组。隧道施工期在掌子面及洞身多次发生大规模涌水（图 2 a)），且初支施工后渗漏水现象较为严重（见图 2 b)）。因此，研究隧道现有排水系统的降压能力至关重要，事关隧道施工安全与运营质量。

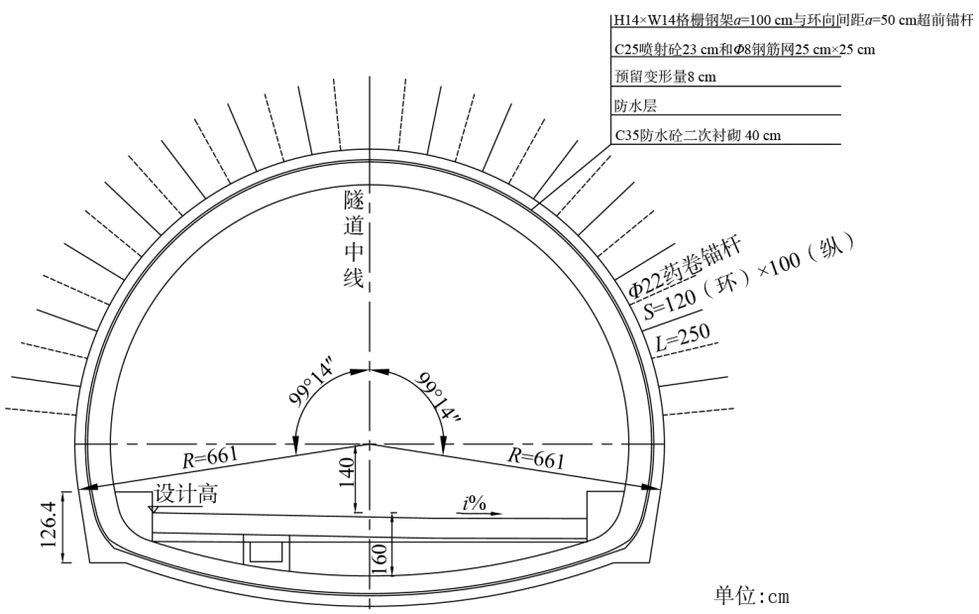



图 1　隧道断面

Fig. 1　Tunnel section

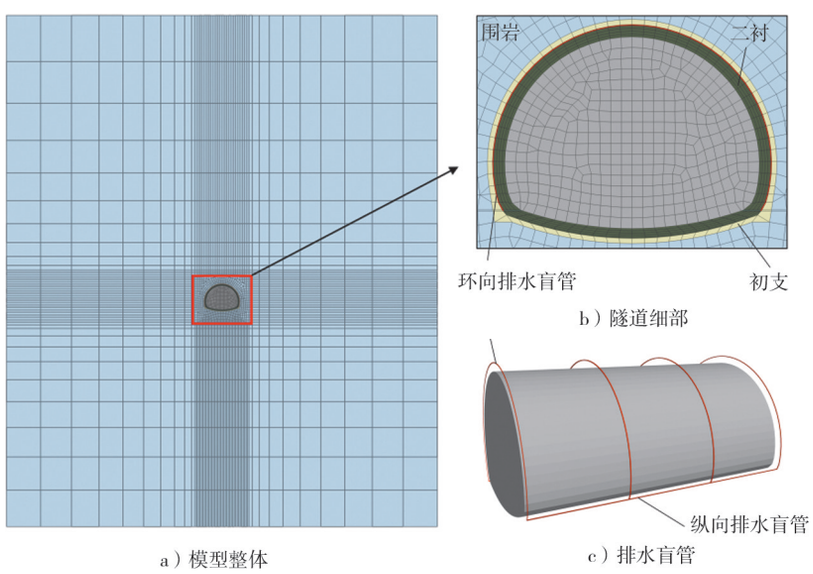
a）涌水 b）初支渗漏水

图 2 隧道施工期地下水情况

Fig. 2 Groundwater situation during tunnel construction

## 2 计算工况与计算参数

本文采用 FLAC3D 有限差分软件，建立三维精细数值模型模拟隧道及环纵向排水盲管，对衬砌水压力分布特征及排水系统的降压能力进行系统研究。围岩、初支、二衬、排水盲管均采用实体单元模拟，网格划分均采用六面体单元，数值模型如图 3 所示。凤凰二号隧道排水系统所用盲管直径为 50 mm。隧道围岩结构参数如表 1 所示。




a）模型整体 b）隧道细部 c）排水盲管

图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

表 1 物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters

| 结 构 | 弹性模量/GPa | 重度/(kN/m$^3$) | 黏聚力/MPa | 泊松比 | 内摩擦角/(°) | 孔隙率 | 渗透系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅳ级围岩 | 3.0 | 22.8 | 0.1 | 0.3 | 23 | 0.35 | $1\times10^{-4}$[22] |
| 初期衬砌 | 28.0 | 19.0 | 2.5 | 0.2 | 45 | 0.25 | $1\times10^{-6}$[23] |
| 二次衬砌 | 31.5 | 25.0 | 3.2 | 0.2 | 50 | — | — |

在隧道防排水体系中，当富水区隧道发生突水、突泥灾害时，常用“以堵为主，堵排结合”的原则来治理，其中“堵”通常通过提高初支附近围岩的抗渗性和承载能力实现[21]，而抗渗性与渗透系数息息相关。周边围岩渗透性改变会影响隧道周边渗流场分布特征，从而导致衬砌水压发生变化，在排水体系设计时应充分考虑围岩与支护间渗透系数的差异。因此，本文除考虑环向盲管间距和水头高度外，还选取了围岩与初支渗透系数比($k_c/k_r$)作为影响因素进行研究。计算工况如表 2 所示。

表 2　计算工况

Tab. 2　Calculation condition

| 工况 | 环向盲管间距/m | 围岩等级 | 地下水位/m | 围岩与初支渗透系数比($k_c/k_r$)[22] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | Ⅳ级 | 10,30,50 | 50,100,200,400,600,800 |
| 2 | 4 | | | |
| 3 | 5 | | | |
| 4 | 6 | | | |
| 5 | 8 | | | |
| 6 | 10 | | | |
| 7 | 12 | | | |
| 8 | 15 | | | |

注：围岩渗透系数不变，仅初支渗透系数改变。

## 3　降压能力评价指标

为研究水头高度、环向盲管间距和围岩与初支渗透系数比对排水系统降压能力的影响，本文提取单元孔隙水压力、单元迎水面积等计算数据，提出了一种降压系数，用于综合表征排水系统的降压能力。通过施作排水系统后的水压综合受力指数 $\bar{p}_{u,1}$ 除以初始水压综合受力指数 $\bar{p}_{u,ini}$ 确定降压系数 $Y_p$。具体计算公式为

$$\bar{p}_u=\frac{\sum_i^n(p_{zi}\times v_{zi})}{l}, \tag{1}$$

$$Y_p=\frac{\bar{p}_{u,1}}{\bar{p}_{u,ini}}, \tag{2}$$

式中：$\bar{p}_u$ 为衬砌结构承受水压力的综合受力指数；$p_{zi}$ 为 $i$ 号单元的孔隙水压力；$v_{zi}$ 为 $i$ 号迎水单元的体积；$l$ 为所研究隧道纵向长度；$n$ 为单元数量；$Y_p$ 为降压系数，其值越小，表明排水体系降压效果越好；$\bar{p}_{u,1}$ 为设置排水系统后的水压综合受力指数；$\bar{p}_{u,ini}$ 为未设置排水系统的水压综合受力指数。

基于以上定义，得到衬砌在不同工况下的 $\bar{p}_u$、$Y_p$ 计算结果如表 3、表 4 所示。

表 3　综合受力指数 $\bar{p}_u$ 统计表

Tab. 3　Statistical table for unit length water pressure accumulation $\bar{p}_u$

MPa·m²

| 环向盲管间距/m | 水头高度 $h_{水}$/m | 不同渗透系数比下的 $\bar{p}_u$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 50 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 |
| 3 | 10 | 0.96 | 1.14 | 1.16 | 1.32 | 1.43 | 1.49 |
| | 30 | 2.44 | 2.75 | 2.84 | 3.26 | 3.84 | 3.96 |
| | 50 | 3.86 | 4.37 | 4.67 | 5.62 | 6.10 | 6.43 |
| 4 | 10 | 1.27 | 1.27 | 1.29 | 1.42 | 1.57 | 1.66 |
| | 30 | 3.09 | 3.12 | 3.18 | 3.51 | 3.85 | 4.05 |
| | 50 | 4.92 | 4.98 | 5.09 | 5.61 | 6.15 | 6.47 |
| 5 | 10 | 1.41 | 1.41 | 1.42 | 1.44 | 1.54 | 1.63 |
| | 30 | 3.46 | 3.49 | 3.54 | 3.62 | 3.86 | 4.07 |
| | 50 | 5.53 | 5.57 | 5.66 | 5.81 | 6.20 | 6.53 |
| 6 | 10 | 1.72 | 1.72 | 1.73 | 1.73 | 1.73 | 1.78 |
| | 30 | 4.23 | 4.24 | 4.26 | 4.29 | 4.31 | 4.41 |
| | 50 | 6.75 | 6.77 | 6.80 | 6.86 | 6.91 | 7.07 |
| 8 | 10 | 1.81 | 1.90 | 1.97 | 2.00 | 2.01 | 2.01 |
| | 30 | 4.48 | 4.68 | 4.82 | 4.88 | 4.89 | 4.91 |
| | 50 | 7.17 | 7.49 | 7.70 | 7.80 | 7.81 | 7.82 |
| 10 | 10 | 1.82 | 1.91 | 1.98 | 2.01 | 2.01 | 2.02 |
| | 30 | 4.49 | 4.69 | 4.83 | 4.89 | 4.90 | 4.92 |
| | 50 | 7.18 | 7.51 | 7.71 | 7.80 | 7.81 | 7.82 |
| 12 | 10 | 1.84 | 1.91 | 1.98 | 2.01 | 2.03 | 2.02 |
| | 30 | 4.55 | 4.71 | 4.84 | 4.92 | 4.95 | 4.94 |
| | 50 | 7.34 | 7.59 | 7.79 | 7.91 | 7.95 | 7.93 |
| 15 | 10 | 1.91 | 1.92 | 1.98 | 2.02 | 2.04 | 2.05 |
| | 30 | 4.88 | 4.88 | 4.99 | 5.09 | 5.13 | 5.16 |
| | 50 | 7.87 | 7.88 | 8.05 | 8.20 | 8.26 | 8.29 |

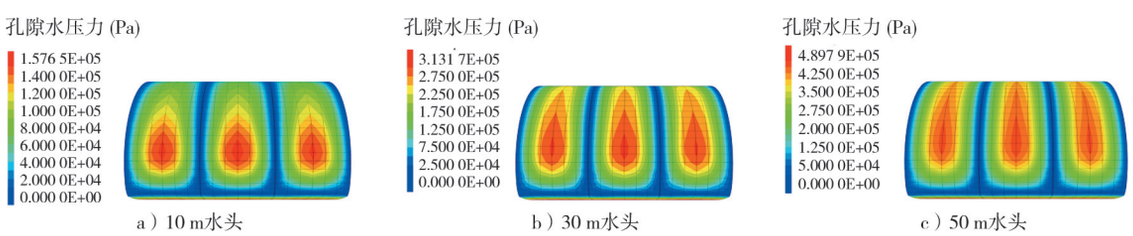
表 4 降压系数 $Y_p$ 统计表

Tab. 4 Statistical table of pressure reduction coefficient $Y_p$

| 环向盲管间距/m | 水头高度 $h_水$/m | 不同渗透系数比下的 $Y_p$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 50 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 |
| 3 | 10 | 0.415 | 0.471 | 0.490 | 0.550 | 0.591 | 0.617 |
| | 30 | 0.424 | 0.479 | 0.497 | 0.578 | 0.682 | 0.751 |
| | 50 | 0.424 | 0.479 | 0.508 | 0.607 | 0.703 | 0.775 |
| 4 | 10 | 0.523 | 0.526 | 0.535 | 0.588 | 0.671 | 0.723 |
| | 30 | 0.538 | 0.544 | 0.556 | 0.622 | 0.703 | 0.770 |
| | 50 | 0.540 | 0.546 | 0.560 | 0.627 | 0.710 | 0.779 |
| 5 | 10 | 0.581 | 0.580 | 0.591 | 0.604 | 0.657 | 0.710 |
| | 30 | 0.603 | 0.607 | 0.618 | 0.642 | 0.705 | 0.772 |
| | 50 | 0.607 | 0.612 | 0.624 | 0.650 | 0.715 | 0.786 |
| 6 | 10 | 0.710 | 0.711 | 0.717 | 0.727 | 0.741 | 0.774 |
| | 30 | 0.737 | 0.738 | 0.744 | 0.761 | 0.787 | 0.838 |
| | 50 | 0.742 | 0.743 | 0.749 | 0.767 | 0.797 | 0.851 |
| 8 | 10 | 0.747 | 0.786 | 0.816 | 0.839 | 0.858 | 0.877 |
| | 30 | 0.780 | 0.816 | 0.843 | 0.866 | 0.893 | 0.934 |
| | 50 | 0.788 | 0.822 | 0.848 | 0.871 | 0.901 | 0.942 |
| 10 | 10 | 0.751 | 0.790 | 0.821 | 0.844 | 0.861 | 0.882 |
| | 30 | 0.782 | 0.817 | 0.844 | 0.868 | 0.895 | 0.934 |
| | 50 | 0.789 | 0.824 | 0.850 | 0.872 | 0.901 | 0.942 |
| 12 | 10 | 0.762 | 0.790 | 0.821 | 0.844 | 0.865 | 0.884 |
| | 30 | 0.793 | 0.820 | 0.47 | 0.873 | 0.902 | 0.937 |
| | 50 | 0.806 | 0.833 | 0.858 | 0.884 | 0.917 | 0.955 |
| 15 | 10 | 0.788 | 0.791 | 0.821 | 0.849 | 0.872 | 0.895 |
| | 30 | 0.850 | 0.850 | 0.873 | 0.903 | 0.937 | 0.979 |
| | 50 | 0.864 | 0.865 | 0.896 | 0.916 | 0.953 | 0.997 |

## 4 衬砌水压力分布特征

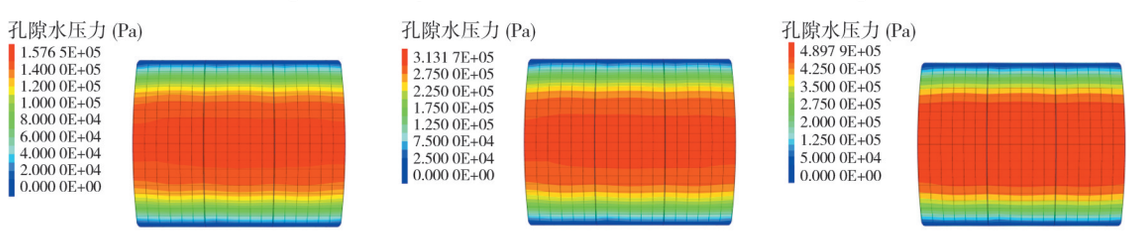
在保持环向盲管间距、围岩与初支渗透系数比不变的情况下，开展不同水头高度对衬砌水压力的影响研究，揭示不同水头高度下衬砌水压力分布规律。由于围岩与初支渗透系数比并不影响衬砌水压力分布形态，限于篇幅，这里设定围岩与初支渗透系数比为 100。以环向盲管间距 5 m 为例，提取衬砌水压力分布如图 4、图 5 所示。由水压力分布云图可以看出，衬砌水压力在排水盲管处有明显降低，在两环向盲管中心位置达到最大。衬砌拱圈最大水压力位于边墙部位。因仰拱未进行排水处理，3 种水头工况下孔隙水压力峰值都位于仰拱，分别约为 0.15、0.31 和 0.49 MPa。




a）10 m水头 b）30 m水头 c）50 m水头

图 4 衬砌拱圈水压力分布云图

Fig. 4 Water pressure distribution at the arch of the lining

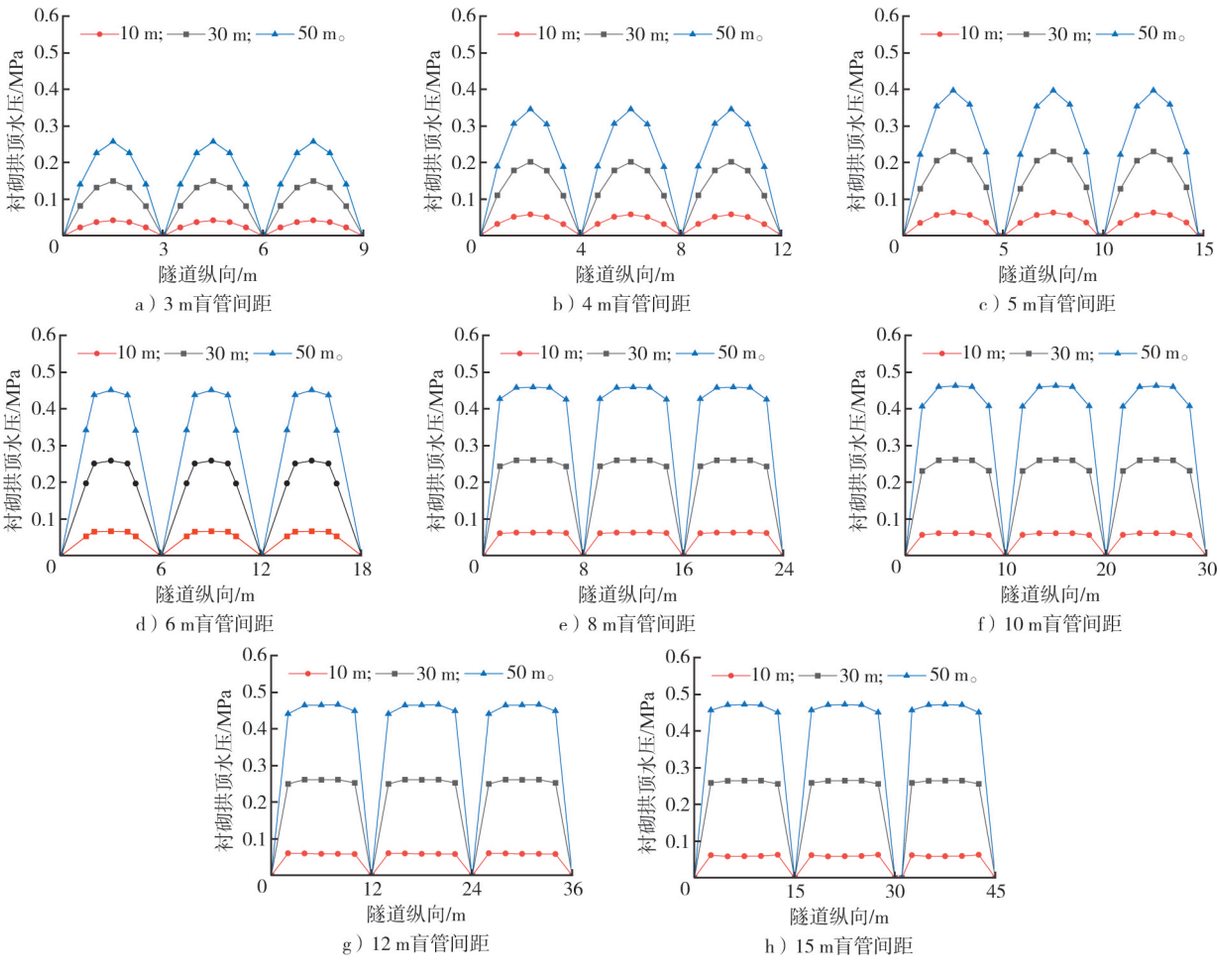



a）10 m水头 b）30 m水头 c）50 m水头

图 5 衬砌仰拱水压力分布云图

Fig. 5 Water pressure distribution at the inverted arch of the lining

为分析衬砌拱部水压力与盲管间距的关系，提取衬砌拱顶水压力沿隧道纵向变化如图 6 所示。从图 6 可以看出，因环向盲管排水作用，当盲管间距在 3～5 m 范围内，拱顶中部区域水压力沿隧道纵向变化显著，衬砌拱顶水压力沿隧道纵向变化特征整体呈现“M”型变化趋势，排水系统降压效果较好；但盲管间距大于 5 m 时，拱顶中部水压力沿隧道纵向变化不明显，其“M”型趋势转变为“低—高—平缓—高—低”如“平顶山”状的趋势，表明盲管间距超过 5 m 后，盲管降压效果开始显著下降。




a）3 m盲管间距　b）4 m盲管间距　c）5 m盲管间距

d）6 m盲管间距　e）8 m盲管间距　f）10 m盲管间距

g）12 m盲管间距　h）15 m盲管间距

图 6　衬砌水压随隧道纵向分布特征

Fig. 6　Distribution characteristics of water pressure in the lining along the longitudinal direction of the tunnel

## 5　降压能力影响因素分析

### 5.1　水头高度对降压能力的影响

在保持盲管间距、围岩与初支渗透系数比不变的情况下，研究排水系统在 10、30 和 50 m 3 种水头高度下的降压能力。为便于讨论，设定环向盲管间距为 5 m、围岩与初支渗透系数比为 100，根据表 3 和表 4 计算结果绘制曲线如图 7 所示。

可以看出，$\bar{p}_u$ 与水头高度呈正比；$Y_p$ 与水头高度为非线性关系，水头高度从 10 m 提升至 50 m 时，$Y_p$ 增加 5.5%，表明排水条件固定时，水头过高，会导致降压系数升高，降压能力降低。因此，设计排水系统时需要综合考虑地层水位情况。

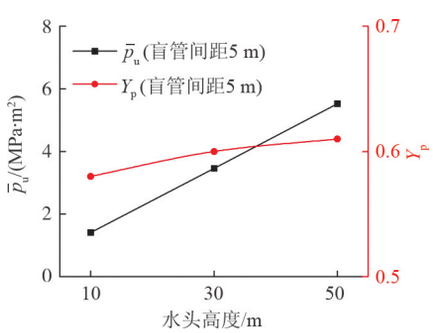
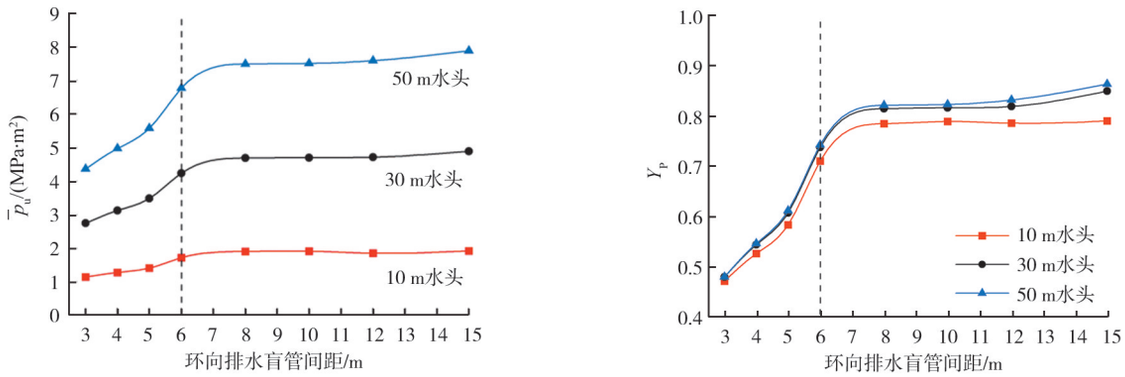



图 7　水头高度影响

Fig. 7　Influence of $h_水$

### 5.2　环向盲管间距对降压能力的影响

在保持水头高度、围岩与初支渗透系数比不变的情况下，研究不同环向盲管间距下衬砌水压力变化规律。设定围岩与初支渗透系数比为 100，根据表 3 和表 4 计算结果绘制曲线如图 8 所示。可以看出，3 种水头高度下曲线变化规律基本一致，$\bar{p}_u$、$Y_p$ 随着盲管间距的增加




a）综合受力指数　　b）降压系数

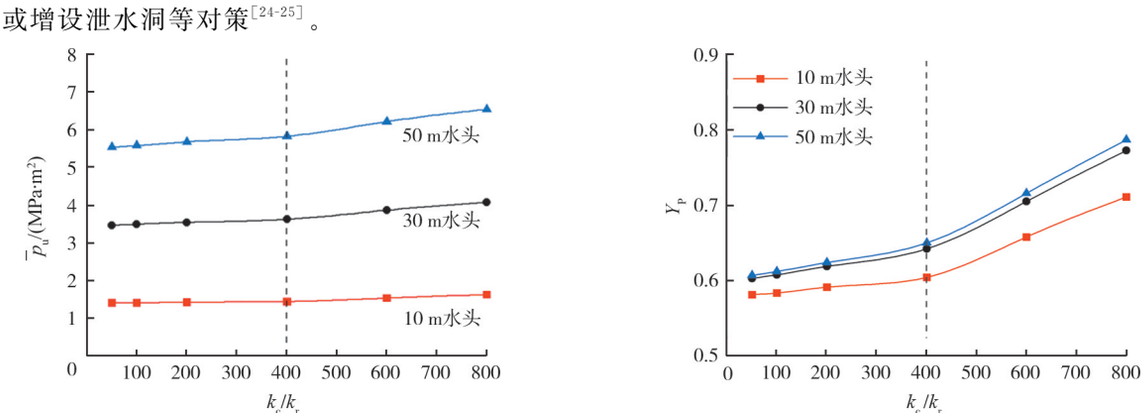
图 8　环向盲管间距的影响

Fig. 8　Influence of circumferential blind pipe spacing

呈现出两阶段的增长规律：当盲管间距从 15 m 减少至 6 m 时，$\bar{p}_u$ 和 $Y_p$ 缓慢减小，3 种水头高度下 $\bar{p}_u$ 分别减少 10%、13%、14%，$Y_p$ 分别减少 10%、13%、14%；当盲管间距从 6 m 减少至 3 m 时，$\bar{p}_u$ 和 $Y_p$ 快速减小，3 种水头高度下，$\bar{p}_u$ 分别减少 33%、34%、35%，$Y_p$ 分别减少 35%、33%、33%。盲管间距小于 6 m 后，排水盲管的降压能力大幅提升，因此建议本隧道环向盲管间距的设置最好应小于 6 m。

### 5.3　围岩与初支渗透系数比对降压能力的影响

在保持水头高度、环向盲管间距不变的情况下，开展不同围岩与初支渗透系数比对衬砌水压力的影响研究。讨论排水系统降压能力在 10、30 和 50 m 3 种不同水头高度下不同围岩与初支渗透系数比的变化规律，设定环向盲管间距为 5 m。根据表 3、表 4 计算结果绘制出曲线如图 9 所示。可以看出，当渗透系数比为 50～400 时，降压系数呈现线性增加变化。渗透系数比从 50 增至 400，3 种水头高度下降压系数分别增加 3%、6.6%、7%；渗透系数比从 400 变化至 800 时，降压系数分别增长 17.5%、20.5%、21.0%。当渗透系数比大于 400 时，曲线斜率变大，3 种水头下 $\bar{p}_u$ 与 $Y_p$ 随系数比增长的幅度平均增长 14%。可知初支渗透系数显著增大时，二衬所受水压力增长幅度会增加，致使 $\bar{p}_u$ 增大，即衬砌水压力显著增加、排水管管径不变时，因排水系统降压能力存在上限值，排水管相对泄水效能反而降低，致使降压系数 $Y_p$ 增大。因此，当二衬处于受较高水压力风险情况下，建议在施工时采取加密排水管间距、对围岩进行注浆加固以降低周边围岩渗透系数或增设泄水洞等对策[24-25]。




a）综合受力指数　　b）降压系数

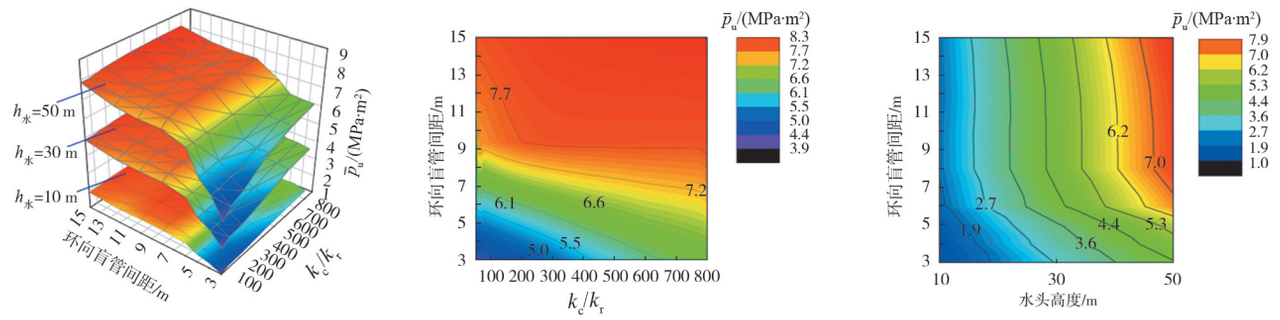
图 9　围岩与初支渗透系数比对衬砌水压力的影响

Fig. 9　Influence of the ratio of surrounding rock to initial support permeability coefficient

### 5.4　多因素混合变化对衬砌水压力及降压系数的影响

考虑到环向盲管间距、围岩与初支渗透系数比、水头高度这 3 个参数对降压能力的影响具有相关性，为了更好地分析 3 个因素变化对衬砌水压力及排水系统降压能力的影响，根据表 3、表 4 计算结果绘制图 10 a)、图 11 a)，综合分析 3 个因素共同影响下的降压能力变化规律。

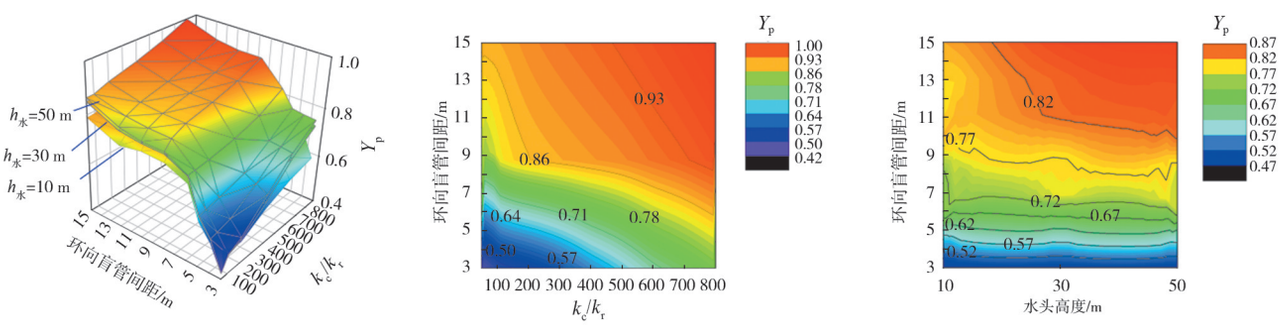
由图 10 a)、图 11 a)可以看出：1)当水头高度、环形盲管间距、围岩与初支渗透系数比都最大时，综合受力指数 $\bar{p}_u$ 和降压系数 $Y_p$ 均达到峰值，分别为 8.3 MPa·m$^2$ 和 0.998；反之，$\bar{p}_u$ 和 $Y_p$ 处于最小，分别




a）汇总图　　b）围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距与综合受力指数　　c）水头高度、环向盲管间距与综合受力指数

图 10　环向盲管间距、围岩与初支渗透系数比、水头高度与综合受力指数的关系

Fig. 10　Relationship between $N$, $k_c/k_r$, $h_{水}$ and $\bar{p}_u$




a）汇总图　　b）围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距与降压系数　　c）水头高度、环向盲管间距与降压系数

图 11　环向盲管间距、围岩与初支渗透系数比、水头高度与降压系数的关系

Fig. 11　Relationship between $N$, $k_c/k_r$, $h_{水}$ and $Y_p$

为 1.1 MPa·m² 和 0.415，此时降压效果最好，$\bar{p}_u$ 减少幅度为 86%，$Y_p$ 减少 58%；2）各曲面整体呈现下凹特征，在盲管间距 3 m 工况时曲面斜率最大；3）相同条件下，水头从 50 m 降至 10 m，$\bar{p}_u$ 平均减少幅度为 75%，$Y_p$ 平均减少幅度仅为 6%，水头高度对综合受力指数 $\bar{p}_u$ 的影响较降压系数 $Y_p$ 更为显著。

为了更清晰地说明因素组合对 $\bar{p}_u$ 的影响，对图 10 a）进行剖面得到图 10 b）、图 10 c）。图 10 b）为围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距与综合受力指数 $\bar{p}_u$ 的关系。红色区域代表综合受力指数 $\bar{p}_u$ 较大区域，蓝色区域代表综合受力指数 $\bar{p}_u$ 较小区域，且靠近蓝色区域等高线越密，表明排水系统降压能力越好。从图 10 b）可以看出：沿竖轴综合受力指数影响范围可从红色区域到蓝色区域，$\bar{p}_u$ 随着环向盲管间距的缩短，从最大值 8.3 MPa·m² 降至 3.9 MPa·m²；沿横轴综合受力指数变化范围最大是从黄色区域到蓝色区域，相比竖轴区域跨度减小，表明渗透系数比对降压能力的影响程度小于环向盲管间距对降压能力的影响程度。图 10 c）为水头高度、环向盲管间距与综合受力指数 $\bar{p}_u$ 的关系。从图 10 c）可以看出：1）水头高度降低时，综合受力指数 $\bar{p}_u$ 明显降低；6 m 盲管间距是个较为显著的分界线，当盲管间距小于 6 m 时，其综合受力指数等值线弯折，表明同一水头高度时，盲管间距小于 6 m，综合受力指数等值线减少幅度明显增加；2）$\bar{p}_u$ 与环向盲管间距成反比，与水头高度呈正比。

为了清晰地说明多因素共同作用对 $Y_p$ 的影响，也分别对图 11 a）进行不同面的解剖，如图 11 b）、图 11 c）所示。图 11 b）是围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距与降压系数 $Y_p$ 的关系。从图 11 b）可以看出：当环向盲管间距为 3～6 m、渗透系数比小于 300 时，为蓝色区域，$Y_p$ 均小于 0.64，此区域表示降压能力较强；若环向盲管间距大于 10 m，渗透系数比小于 700，则属于橙红区域，$Y_p$ 为 0.84～1.0，降压能力相对较弱。图 11 b）规律范围与图 10 b）一致。图 11 c）是水头高度、环向盲管间距与降压系数 $Y_p$ 的关系。从图 11 c）可以看出：随水头高度（沿横轴）变化，在环向盲管间距小于 10 m 时，$Y_p$ 处于同色系区块，受影响较小；当环向盲管间距大于 10 m 后，$Y_p$ 则随水头高度升高而增加，降压能力降低，表明若盲管间距大于 10 m，排水系统能力不足，水头升高，降压不及时导致 $Y_p$ 增加，与 5.3 节结论一致。

基于以上研究结果，考虑到环向盲管间距、围岩与初支渗透系数比、水头高度 3 个因素对降压的综合影响，为了能更好地表征、预测各因素对衬砌降压能力的影响程度，以及为盲管排水体系的设计施工提供量化依据，以 6 m 环向盲管间距为分界点，进行多项式回归分析，得到综合受力指数 $Y_p$ 预测公式如式(3)、(4)所示。

$$\bar{p}_{(u,n\leqslant 6)}=(0.074\ 6h_{水}+0.250\ 1)\times[-2.81\times10^{6}+1\ 275\times\frac{k_c}{k_r}+2.636\times10^{6}\times N-0.968\ 8\times(\frac{k_c}{k_r})^{2}-13.75\times\frac{k_c}{k_r}\times N-5.963\times10^{5}\times N^{2}+0.229\ 6\times N\times(\frac{k_c}{k_r})^{2}-41.28\times\frac{k_c}{k_r}\times N^{2}+4.73\times10^{4}\times N^{3}],\tag{3}$$

$$\bar{p}_{(u,n>6)}=(0.074\ 6h_{水}+0.250\ 1)\times[-1.233\times10^{6}-400.5\times\frac{k_c}{k_r}+9.159\times10^{5}\times N-0.049\ 6\times(\frac{k_c}{k_r})^{2}+144.3\times\frac{k_c}{k_r}\times N-8.785\times10^{4}\times N^{2}-0.033\ 5\times N\times(\frac{k_c}{k_r})^{2}-4.97\times\frac{k_c}{k_r}\times N^{2}+270\ 5\times N^{3}],\tag{4}$$

式中：$\bar{p}_{(u,n\leqslant 6)}$、$\bar{p}_{(u,n>6)}$为综合受力指数，Pa·m$^2$；$N$ 为环向盲管间距，m；$h_{水}$ 为水头高度，m；$\frac{k_c}{k_r}$为围岩与初支渗透系数比。

图 12 为所有工况 $\bar{p}_u$ 预测值和计算值的对比结果。可以看出，预测误差均在 10%以内，最大误差为 8.25%，工况平均误差为 1.63%，表明得到的综合受力指数预测公式有较好的精度。

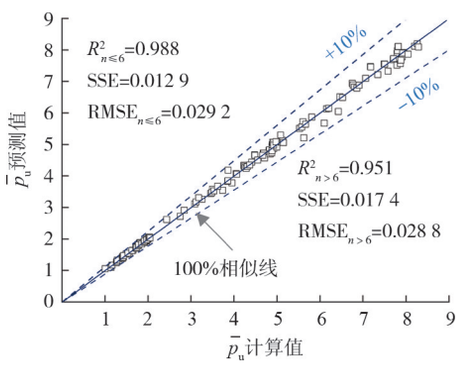



图 12 $\bar{p}_u$ 预测值与计算值对比

Fig. 12 Comparison between predicted and calculated values of $\bar{p}_u$

## 6 现场应用

依托工程隧道防排水设计提出的是环向盲管沿隧道纵向间距为 10 m，遇水量较大时，环向盲管应适当加密。本文中各环向盲管间距、渗透系数比与降压效果的相关研究表明，环向盲管间距小于 6 m 时衬砌结构的降压效果较好。综合考虑安全性与经济性，认为环向盲管间距设为 5 m 较为合理，文献[12]也得到了类似结论。鉴于此，考虑工程实际，实际施工时依托工程隧道在局部富水段将环向盲管纵向间距设置为不大于 5 m。图 13 为富水段环向盲管加密施作及二衬情况。现场应用表明，富水段二衬结构无渗漏水及开裂问题，变形及受力满足要求。

a）环向盲管施作　　b）二衬情况

图 13 现场应用

Fig. 13 On-site application

## 7　结　语

为研究富水地层隧道衬砌水压力分布特征及排水系统的降压能力，依托贺州至巴马高速公路（来宾至都安段）凤凰二号隧道工程，提出了一种新的排水系统降压能力综合评价方法，分析了环向盲管间距、水位高度和围岩与初支渗透系数比 3 个关键因素对排水盲管降压能力的影响规律，得到如下结论。

1）排水系统对衬砌水压力降压效果明显，衬砌水压力峰值都位于仰拱，衬砌水压力在两环向盲管中心位置达到最大；盲管间距大于 5 m 时，盲管降压效果显著下降。

2）提出采用综合受力指数 $\bar{p}_u$、降压系数 $Y_p$ 评价排水系统的降压能力，降压能力同围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距呈反比，水头高度与降压能力相关性较小；相比渗透系数比、水头高度，综合受力指数 $\bar{p}_u$、降压系数 $Y_p$ 受环向盲管间距变化影响较大。

3）综合安全性与成本效益，建议环向盲管间距应设为 5 m。在隧道不是全封衬砌且需要排水的条件下，若围岩初支渗透系数比过大或水头高度过高，可缩小盲管间距或进行围岩注浆加固减小围岩渗透系数，以增加排水系统降压能力，保障衬砌结构安全。

4）基于数值计算结果，回归分析得到考虑水头高度、围岩与初支渗透系数比、环向盲管间距 3 个影响因素下的排水系统降压能力预测公式，最大预测误差是 8.25%，预测精度较高。

本文仅采用数值模拟进行了研究，未来应采用理论解析与模型试验的手段进一步验证排水系统降压能力综合评价方法的准确性，研究所提的评价方法对不同排水系统的适用性，为隧道防排水体系的设计与施工提供依据。

### 参考文献/References：


[1] 兰庆男，许芃，陶伟明，等. 隧道集水廊道底板型衬砌结构排水泄压能力研究[J]. 人民长江，2022，53(7)：142-147.
LAN Qingnan，XU Peng，TAO Weiming，et al. Drainage and pressure relief capacity of floor lining of catchment Channel in railway tunnels [J]. Yangtze River，2022，53(7)：142-147.

[2] 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)：1884-1898.
FAN Haobo，ZHOU Dingkun，LIU Yong，et al. Mechanical response characteristics of lining structure of pipeline karst tunnels in water-rich areas[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(7)：1884-1898.

[3] 王刚，王立川，仇文革，等. 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，et al. 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] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[D]. 成都：西南交通大学，2005.
GAO Xinqiang. Study on the Distribution Rule of Water Pressure Upon Lining in Subject to High Hydraulic Pressure Mountain Tunnel [D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2005.

[5] 高新强，艾旭峰，孔超. 高水压富水区裂隙岩体隧道渗流场的特征[J]. 中国铁道科学，2016，37(6)：42-49.
GAO Xinqiang，AI Xufeng，KONG Chao. Characteristics of seepage field of fractured rock mass tunnel in high water pressure and rich water zone[J]. China Railway Science，2016，37(6)：42-49.

[6] 张明德. 岩溶隧道围岩渗流场分布和衬砌水压力特征研究[D]. 北京：北京交通大学，2008.
ZHANG Mingde. Study on the Characteristics of Seepage Field and Water Pressure on Tunnel Lining in Karst Ground[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2008.

[7] 袁慧. 高水压岩溶隧道衬砌水压力特征研究[D]. 北京：北京交通大学，2009.
YUAN Hui. Study on the Distribution Rule of Water Pressure Upon Lining in Subject to High Hydraulic Pressure Mountain Tunnel[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2009.

[8] MENG Yaoyao，JING Hongwen，YIN Qian，et al. Experimental study on seepage characteristics and water inrush of filled karst structure in tunnel[J]. Arabian Journal of Geosciences，2020. DOI：10.1007/s12517-020-05474-9.

[9] 徐强，宋玉香，樊浩博，等. 富水岩溶隧道衬砌结构水压力分布特征模型试验研究[J]. 中国铁道科学，2022，43(4)：74-83.
XU Qiang，SONG Yuxiang，FAN Haobo，et al. Model test study on water pressure distribution characteristics of lining structure in water-rich karst tunnel[J]. China Railway Science，2022，43(4)：74-83.

[10] 王星，贺维国，费曼利，等. 超大跨度隧道结构防排水设计与施工技术研究[J]. 隧道建设（中英文），2022，42(7)：1267-1273.
WANG Xing，HE Weiguo，FEI Manli，et al. Waterproof and drainage design and construction technology of super-large-span tunnel structures[J]. Tunnel Construction，2022，42(7)：1267-1273.

[11] 郑波，王建宇，吴剑. 高水压富水隧道地下水处治理念与对策[J]. 现代隧道技术，2019，56(sup1)：51-57.
ZHENG Bo，WANG Jianyu，WU Jian. Treatment concept and countermeasures for groundwater in water-rich tunnel with high water pres-

sure[J]. Modern Tunnelling Technology,2019,56(sup1):51-57.

[12] 李化云,周伟,尚明源,等. 富水区隧道排水网络体系卸压能力研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(26):11668-11674.
LI Huayun,ZHOU Wei,SHANG Mingyuan,et al. Discharge capacity of tunnel drainage network system in water-rich area[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(26):11668-11674.

[13] 邹育麟,何川,胡雄玉,等. 富水区隧道合理防排水型式及注浆加固参数研究[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(4):485-491.
ZOU Yulin,HE Chuan,HU Xiongyu,et al. Study on reasonable waterproof and drainage pattern and grouting parameter of rich water tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2014,34(4):485-491.

[14] 李晓军,刘荆辉. 防排水系统对复合式衬砌渗透特性的影响及表征方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):995-1003.
LI Xiaojun,LIU Jinghui. Effect of waterproof and drainage system on seepage properties of composite characterization method[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2021,49(7):995-1003.

[15] 李彬. 隧道复合式衬砌排水垫层的排水卸压能力研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
LI Bin. Research on Ability of Drainage Cushion in Tunnel Composite Lining[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.

[16] 袁溢. 深埋岩溶富水地层铁路隧道泄水洞设计[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(3):834-839.
YUAN Yi. Design of railway tunnel drainage tunnel in the stratum with large water volume in the karst area with large depth[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(3):834-839.

[17] LIU Ning,PEI Junhao,CAO Chengyong,et al. Geological investigation and treatment measures against water inrush hazard in karst tunnels:A case study in Guiyang, southwest China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022. DOI: 10. 1016/j. tust. 2022. 104491.

[18] 李鹏飞,张顶立,赵勇,等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(2):280-288.
LI Pengfei,ZHANG Dingli,ZHAO Yong,et al. Study of distribution law of water pressure acting on composite lining and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(2):280-288.

[19] JANG Y S,KIM B,LEE J W. Evaluation of discharge capacity of geosynthetic drains for potential use in tunnels[J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(3):228-239.

[20] 王秀英,谭忠盛,王梦恕,等. 厦门海底隧道结构防排水原则研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(sup2):3810-3815.
WANG Xiuying,TAN Zhongsheng,WANG Mengshu,et al. Study on waterproof and drainage principles of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007(sup2):3810-3815.

[21] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 铁道建筑技术,2008(2):1-6.
WANG Jianyu. Problems on external water pressure on tunnel lining[J]. Railway Construction Technology,2008(2):1-6.

[22] 马青,罗禄森,阳军生,等. 岩溶富水区深埋水沟排水隧道注浆圈参数研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(11):1793-1799.
MA Qing,LUO Lusen,YANG Junsheng,et al. Study of parameters of grouting circle for deep-ditch drainage tunnel in water-rich karst area[J]. Tunnel Construction,2018,38(11):1793-1799.

[23] 李洪涛. 排水模式对高速铁路隧道仰拱变形影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
LI Hongtao. Study on the Influence Mode on the Deformation of Inverted Arch of High Speed Railway Tunnels[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.

[24] 王小浪,方钱宝,卢锋,等. 岩溶暗河区可流失砂层铁路隧道修建风险分析与控制对策[J]. 建筑技术开发,2023,50(4):146-149.
WANG Xiaolang,FANG Qianbao,LU Feng,et al. Risk analysis and control measures of railway tunnel construction in leachable sand stratum in karst underground river area[J]. Building Technique Development,2023,50(4):146-149.

[25] 李宗利,裴向辉,吕从聪,等. 隧道透水性衬砌环渗透系数合理取值与工程措施探讨[J]. 岩土工程学报,2014,36(6):1167-1172.
LI Zongli,PEI Xianghui,LYU Congcong,et al. Reasonable permeability coefficient and engineering measures of concrete lining circle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(6):1167-1172.