

# 富水弱胶结砂岩隧道地表降水参数优化研究

赵梓宇<sup>1</sup>, 任玉鹏<sup>2</sup>, 董耀斌<sup>2</sup>, 陈宏文<sup>1</sup>, 樊浩博<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 中国铁路兰州局集团有限公司 银川工程建设指挥部, 宁夏 银川 750000)

**摘要:**富水弱胶结砂岩成岩性差, 遇水易失稳成流塑状。为保障隧道施工安全, 依托某隧道工程开展地表降水参数优化研究。通过数值模拟和现场试验, 分析地表深井降水时间、间距、直径对地下水水位的影响。数值结果表明, 采用地表超深井降水时, 砂岩地层地下水水位先大幅下降, 随后逐渐趋于稳定。随着降水井间距的减小和降水井直径的增加, 降水稳定后的地下水水位也逐渐降低。从降水效果来看, 降水井间距是影响地下水水位的主要因素, 试验结果与数值结果吻合良好。综合多因素考虑, 建议砂岩地层超深井降水井参数为: 间距 16 m、直径 600 mm、预降水时间 90 d。研究结果可为富水砂岩隧道的安全施工提供借鉴。

**关键词:**富水砂岩隧道; 地表降水优化; 数值模拟; 降水井间距; 降水井直径

**中图分类号:** U455.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0045-07

## 0 引言

随着中国高速铁路网建设的不断推进, 富水弱胶结砂岩隧道、大埋深流砂地层隧道建设越来越多, 富水深埋弱胶结砂岩地层成岩性差、难自稳、遇水易失稳成流塑等<sup>[1-2]</sup>, 给铁路隧道的建设带来了诸多难题, 所以解决水害也就成为富水砂岩隧道建设的首要问题。

富水砂岩隧道围岩遇水易发生恶化, 进一步发生掌子面滑塌挤出, 表现出较强的水敏性。LIU et al<sup>[3]</sup>、MUHA et al<sup>[4]</sup>、王秀英等<sup>[5]</sup>、ZHAO et al<sup>[6]</sup>通过试验分析了含水砂岩弹性模型等力学性质随浸泡时间及暴露时间的变化规律, 得出水诱导软化导致砂岩强度和耐久性显著下降。因此, 在富水砂岩隧道施工时, 进行围岩降水尤为重要。富水砂岩隧道围岩降水的方案主要包括轻型井点降水、超前真空管降水、洞内垂直降水井、地表降水<sup>[7]</sup>。李宁等<sup>[8]</sup>、王广宏等<sup>[9]</sup>、邹翀等<sup>[10]</sup>依托桃树坪隧道, 针对三级综合降水对第三系泥质弱胶结富水粉细砂岩地层的降水效果进行研究, 结果表明, 三级综合降水技术可有效降低地层含水率, 实现隧道的无水作业。洞内降水虽施工简单、易于管理, 但其降水范围和降深较小, 地下水水位较高区域降水效果差, 同时洞内轻型井点密布必将对两侧及掌子面土体稳定性产生大幅扰动; 地表降水具有施工简单、降水范围广、降深大的特点, 越来越受到人们重视。SUN et al<sup>[11]</sup>、CAGRI et al<sup>[12]</sup>通过数值模拟和模型试验, 针对砂土层隧道排水引起的地下水位变化, 对隧道及周边环境的影响展开研究, 得出了地下水位对隧道影响规律。SHI et al<sup>[13]</sup>、HOU et al<sup>[14]</sup>基于三维断裂网渗流模型和流量平衡原理, 准确求解了隧道瞬态渗入对隧道面稳定性的影响。DONG et al<sup>[15]</sup>考虑不同衬砌和注浆、不同排水条件对隧道周围渗流场和应力场的影响, 得出对孔隙水压力分布、流网的影响规律, 该结果可用于含水隧道的优化设计。

上述学者对含水砂岩地层隧道洞内施工降水、浅井地表降水、不同降水参数进行了深入研究, 得到了丰富的研究成果。但针对新近系富水弱胶结砂岩地层的超深井降水以及参数优化研究还相对较少。基于此, 以中卫至兰州铁路某隧道为依托, 对地表降水在富水弱胶结砂岩地层中的降水效果进行数值模拟和试验研究, 提出合适的降水井优化参数, 为富水弱胶结砂岩隧道的设计和施工提供指导。

收稿日期: 2023-12-04 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxkxbzrb.20230332

基金项目: 青年人才托举工程项目(2021QNRC001); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023079)

作者简介: 赵梓宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为富水隧道降水技术。E-mail: 1651275373@qq.com

赵梓宇, 任玉鹏, 董耀斌, 等. 富水弱胶结砂岩隧道地表降水参数优化研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 45-51.

## 1 工程概况

以某富水砂岩隧道为依托,其位于宁夏中卫市沙坡头区,隧道起讫里程为 DK39+990~DK57+753.3,全长 17 763.3 m,为铁路单洞双线隧道,隧道最大埋深约 390 m。根据设计地质调查 DK43+925~DK44+515 段围岩为新近系中新统砂岩夹泥岩、砾岩,弱风化,成岩作用差。地下水主要为基岩裂隙孔隙水,地下水位线位于隧道拱顶以上,该地质砂岩具有非常敏感的水稳特性,遇水极易发生围岩失稳、突泥涌砂;围岩含水率为 16%~22%,渗透系数为 0.02~0.05 m/d,为弱透水地层。隧道开挖后短时间表面湿润,有汗状渗水,随暴露时间进而转为流塑状态,见图 1,甚至出现塌陷滑坡等局部地段危害,严重影响隧道的施工安全。为了提高围岩稳定性,对隧道地层上半断面进行了周边注浆,周边注浆浆液采用双液浆,水泥浆液水灰比为 1:1,水玻璃中溶质与水之比为 1:2,水玻璃与水泥浆液比例为 1:1,注浆压力为 2.5 MPa,同时为了进一步提升围岩的稳定性,需要在砂岩地层隧道施工之前开展降水工作来降低围岩含水率。



图 1 掌子面砂岩遇水软化

## 2 地表超深井降水数值模拟研究

### 2.1 模型建立

选取典型砂岩段,使用有限元软件 Midas gts/nx 进行建模分析。模型尺寸为:长×宽×高=120 m×60 m×180 m,隧道埋深 137 m,仰拱至模型底部 30 m,静水位位于地表以下 68.2 m 位置处。降水井距正洞两侧净距 5 m,单侧间距和直径根据所设工况选取,两侧交错布置,如图 2 所示。隧道上半断面采用厚度为 3 m 的周边注浆加固。围岩地层采用摩尔-库伦本构,注浆圈和降水井采用弹性本构进行模拟。在模型四周和底部施加法向约束,并设置为不透水边界,模型顶面为自由边界。在地表以下 68.2 m 位置处设置节点总水头模拟地下水位补给。

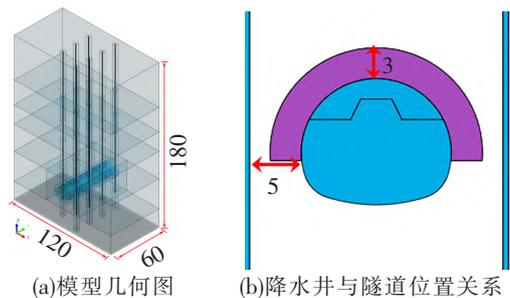


图 2 模型示意图(单位:m)

### 2.2 模型参数设置

围岩及注浆加固圈参数来自地质勘查报告和相关文献取值<sup>[6,9]</sup>,具体如表 1 所示。

表 1 模型土体参数

地层	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	泊松比	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
风化土	18.0	30	40	25	0.35	2.00×10 <sup>-5</sup>
砂质黄土	15.0	50	80	36	0.40	5.00×10 <sup>-6</sup>
混合岩层	16.7	200	60	35	0.30	1.00×10 <sup>-7</sup>
泥岩	18.8	400	150	40	0.38	3.00×10 <sup>-8</sup>
砂岩	17.7	350	20	35	0.28	4.63×10 <sup>-7</sup>
泥质砂岩	17.7	350	40	35	0.28	2.31×10 <sup>-7</sup>
粉砂岩	21.1	350	110	38	0.36	1.15×10 <sup>-7</sup>
注浆圈	19.0	20 000	900	45	0.21	2.00×10 <sup>-9</sup>

### 2.3 模型工况

重点分析降水井间距、直径和降水时间对降水效果的影响,降水井间距为 10~28 m,直径为 600~1 000 mm,降水时间间隔分别为 1 s、1、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 d,分析不同时刻地下水位位置和渗流场分布情况,模型工况设置如表 2 所示,并同时提取各个工况模型中的孔隙水头和地下水位等数据进行分析。

表 2 数值模拟工况

工况	井管间距/m	井管直径/mm	工况	井管间距/m	井管直径/mm
A-1	10	600	A-6	24	600
A-2	12	600	A-7	28	600
A-3	14	600	B-1	16	800
A-4	16	600	B-2	16	1 000
A-5	20	600			

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 降水井间距影响分析

砂岩隧道地层在开始布置降水井后,选取相邻两口降水井中间断面为参照,提取不同降水井间距下抽水稳定后的孔压水头,分析其对隧道降水效果的影响,如图 3 所示。

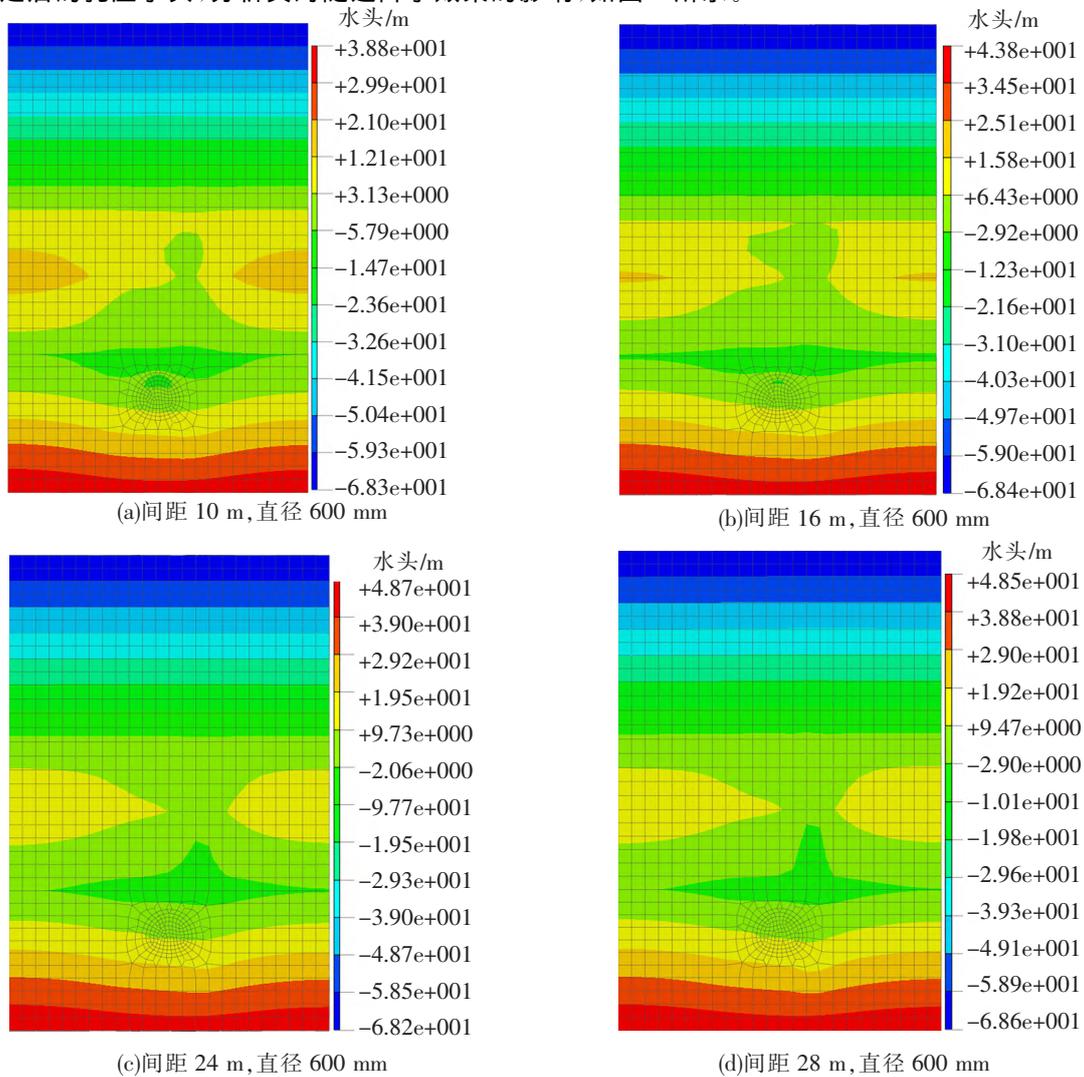


图 3 不同降水井间距渗流场分布图

由图 3 可知,当降水井直径为 600 mm 时,降水井间距变化对渗流场分布影响显著。随着降水井布置间距减小,隧道上部的水位贯通区域整体在缩小,相邻区段的水力梯度和地下水位也逐渐减小。

选取降水井间距 16 m、直径 600 mm 工况为例,对渗流场变化和注浆圈影响进行分析,注浆圈内外侧的孔隙压力水头随时间变化如图 4 所示。

由图 4 可知,随着渗流时间的增加,地层孔压水头在前 50 d 大幅度下降,50~90 d 时水头小幅度降低,第 90 d 时达到稳定。降水稳定后,注浆范围内外侧的孔压水头相差较大,最大孔压水头差值位于顶部区域,测点 W1 和 N1 水头差值为 6.91 m。从注浆圈顶部至边墙区域,注浆圈内外侧水头差逐渐减小,并在隧道边墙未注浆区域达到一致。隧道上半断面采用周边注浆加固时,可以改变砂岩的工程特性,提高其抗渗性,并起到一定的阻水作用。

### 3.2 降水井直径影响分析

在保持降水井纵向间距不变的情况下,分析不同降水井直径对地层孔压水头的影响,如图 5 所示。

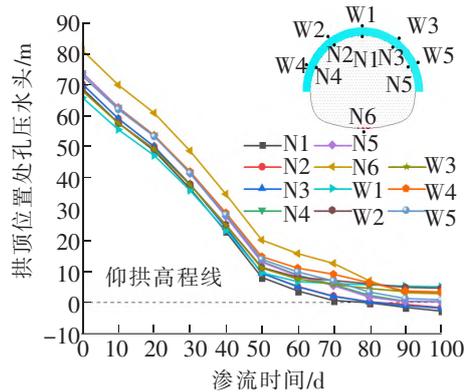


图 4 注浆圈内外侧的孔隙压力水头随时间变化(工况 A-4)

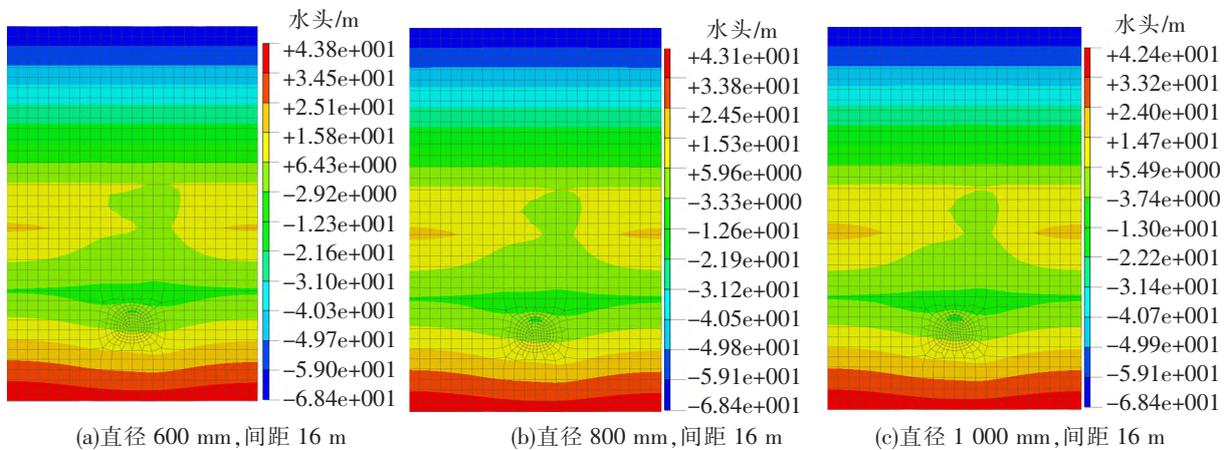


图 5 不同降水井直径渗流场分布图

由图 5 可知,当降水井间距为 16 m,改变降水井井管直径,对渗流场的影响较小。随着降水井井径增大,隧道上部的水位贯通区域整体变化很小,相邻区段的水力梯度和地下水位减小幅度较小。

为对比分析不同降水井直径和间距对地层孔压水头的影响,提取不同工况下隧道拱顶部位的孔压水头和地下水位结果进行分析,如图 6 和图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,采用不同降水井参数时,拱顶部位的孔压水头变化规律基本一致。降水井开始工作的 0~50 d 内孔隙水压水头大幅度降低,水头降低占最终抽水稳定时的 80%左右,50~90 d 时孔压水头小幅度降低,抽水 90 d 时地下水位达到稳定值。此时,继续增大抽水时间对孔压水头影响不大。

由图 7 可知,降水稳定后的地下水位表现为两侧高中间低的漏斗状,减小降水井间距比增大直径对孔压水头的减小效果更好。当降水井间距为 16 m,直径为 600

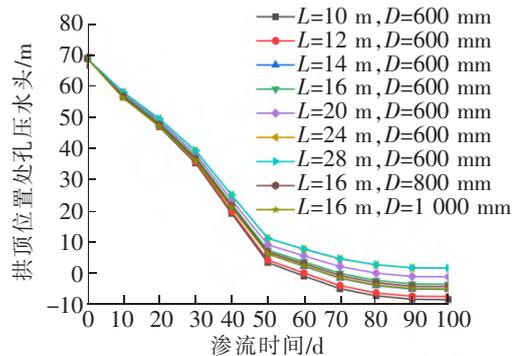


图 6 不同工况下隧道拱顶部位的孔压水头随时间变化曲线

mm 时,降水稳定后地下水位位于拱顶以下 3.53 m,水位降深为 71.98 m。随着降水井直径增大至 1 000 mm 时,降水稳定后地下水位位于拱顶以下 5.09 m,水位降深为 73.89 m,增大降水井直径对地下水位降低效果不明显。当降水井间距为 28 m 时,降水稳定后地下水位位于拱顶以上 5.96 m,地下水位降深 62.84 m。随着降水井间距减小至 10 m,地下水位降低至拱顶以下 7.70 m,水位降深 76.50 m,水位降低效果十分显著。在选择降水井参数时,为提高地表降水效果,应优先考虑减小降水井间距。

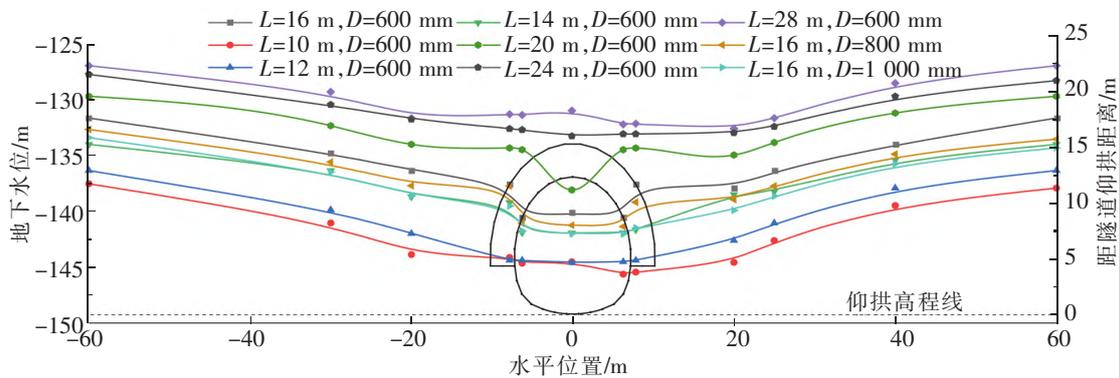


图 7 不同工况下隧道地下水位对比图

进一步分析降水稳定后的地下水位可知,当降水井间距大于 20 m 时,降水稳定后地下水位均位于隧道拱顶以上,隧道现场施工仍然较为困难。当降水井间距为 16 m 时,水位位于拱顶以下 3.18 m,为隧道中台阶位置,配合周边注浆加固,施工可正常开展。当间距由 16 m 减小至 14、12、10 m 时,水位则逐渐降低至拱顶以下 5.03、7.63、7.70 m,地下水位降低效率迅速降低,施工经济性较差。

### 3.3 降水井参数优化分析

根据数值模拟结合现场施工因素,对降水井参数进行优化分析。

(1)降水效果。从降水效果分析,减小降水井间距可有效提升降水效果。当降水井直径为 600 mm、间距为 16 m 时,地下水位位于隧道中台阶位置,施工可正常开展。随着降水井间距进一步减小,在历时 3 个月的连续抽水后,加密后群井抽水量逐渐达到其最大出水能力;降水井间距减小到 12 m 后,间距因素影响达到极限,地下水位不再降低。因此,降水井间距可选择 12~16 m。

(2)施工简便性。从施工简便性来看,在砂岩地层深井打孔降水,随着孔径变大,成孔难度变大,井孔易塌孔,施工复杂,随着降水井直径的增大,地下水位降低效果不明显。因此,降水井直径建议选取 600 mm。随着降水井间距的减小,需要施作的降水井数量也相应增加,施工效率降低,因此,降水井间距也不宜过小。

(3)经济性。从经济性分析,随着间距减少 5 m,工程投资增加约 10%,随着孔径增大,塌孔重打和淤泥堵管风险增高,增加了整改修复费用。

## 4 地表降水现场试验验证

### 4.1 降水井布置及施工

基于前述研究,选取 DK44+217~DK44+361 富水弱胶结砂岩区段作为现场试验的范围,布置了 26 口降水井和 4 口观测井,平均孔深为 145.2 m。降水井单侧间距 16 m、井管直径 600 mm,隧道两侧梅花状布置,距正洞轮廓线外侧 5 m,井管深入仰拱以下 20 m。

### 4.2 地表超深井降水后地下水位变化规律

降水井正式抽水之前,提前进行试抽水作业,试抽水完成后开始连续地表降水,直至地下水位达到稳定为止。抽水过程中各观测井地下水位变化如图 8、图 9 所示。

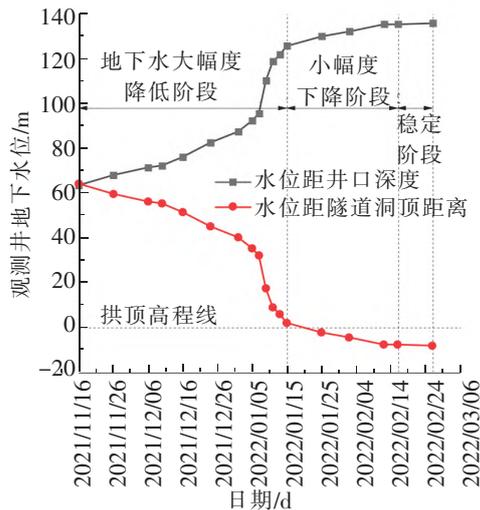


图 8 8# 观测井降水水位示意图

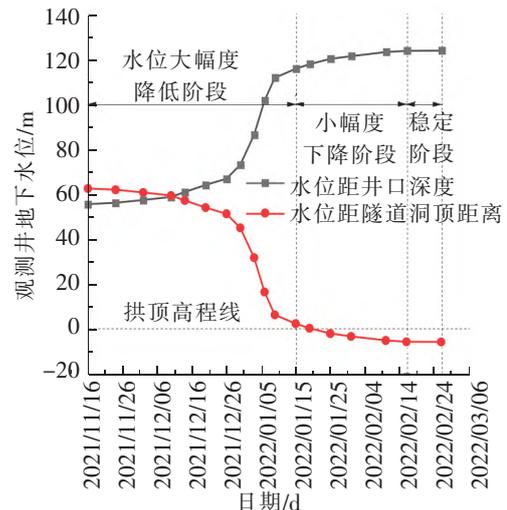


图 9 9# 观测井降水水位示意图

由图 8、图 9 可知, 8#、9# 观测井数据显示, 降水井抽水工作开展前期水位下降速率最快, 抽水 0~50 d 左右时的水位下降值分别为 48、60 m, 占最终降水井抽水稳定水位下降值的 85% 左右。观测井周围的降水井水位在抽水 90 d 左右后达到稳定, 水位降至拱顶以下 5 m 左右, 稳定后各观测井水位降深分别为 69.8、67.2 m。地表超深井效果较好, 能够满足隧道安全施工的要求。

对比图 7~图 9 可知, 数值模拟所得的地下水位降深规律均表现为 0~50 d 左右降幅最大, 50~90 d 时小幅度降低, 90 d 左右时趋于稳定, 与现场试验结果吻合良好, 降水井提前 90 d 开始正常抽水可达到水位降深的预期效果。

## 5 结论

(1) 新近系富水弱胶结砂岩隧道采用地表超深井降水时, 随着抽水时间的增加, 0~50 d 地下水位下降速率最快, 50~90 d 地下水位小幅降低, 到 90 d 时趋于稳定, 降水井抽水与地下水的补给达到动态平衡, 地表降水稳定后的地下水位表现为两侧高中间低的漏斗状。

(2) 随着降水井间距的减小, 地下水位显著降低; 但随着降水井直径的增大, 地下水位降低不明显。当降水井直径为 600 mm、间距为 12~16 m 时, 降水稳定后地下水位位于拱顶以下 3.53~7.63 m, 可满足现场施工的需求。

(3) 地表降水现场试验结果表明, 当降水井直径为 600 mm、间距为 16 m 时, 地下水位前期大幅度下降, 到 90 d 左右达到稳定, 最终水位降至拱顶以下 5 m 附近, 降深为 70 m 左右, 试验结果与模拟结果吻合良好。综合考虑降水效果、施工简便性及经济性, 建议砂岩地层超深井降水井间距为 16 m, 直径为 600 mm, 预降水时间为开挖前 90 d。

## 参 考 文 献

- [1] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 饱和水弱胶结砂岩剪切断裂面形貌特征及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2444-2451.
- [2] 纪洪广, 蒋华, 宋朝阳, 等. 弱胶结砂岩遇水软化过程微观结构演化及断口形貌分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 993-999.
- [3] LIU H L, ZHU W C, YU Y J, et al. Effect of water imbibition on uniaxial compression strength of sandstone [J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104200 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160919301194>.
- [4] MUHA A, ZHOU H, YANG F J, et al. Water-induced softening behavior of clay-rich sandstone in Lanzhou Water Supply Project [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(3): 557-570.
- [5] 王秀英, 谭忠盛, 王永红, 等. 兰渝铁路含水弱胶结砂岩隧道地层特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 191-195.

- [6] ZHAO J P, TAN Z S, WANG X Y, et al. Engineering characteristics of water-bearing weakly cemented sandstone and dewatering technology in tunnel excavation [J/OL]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 121: 104316 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779821005071>.
- [7] 李小丰. 富水粉细砂围岩隧道地下水渗流特性及支护方案研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(7): 1799-1807.
- [8] 李宁, 李国良. 兰渝铁路特殊复杂地质隧道修建技术[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(3): 481-490.
- [9] 王广宏, 罗利彬. 富水未成岩粉细砂层隧道降水技术研讨[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(增刊 1): 142-147.
- [10] 邹翀, 张文新. 未成岩富水地层隧道洞内综合降水施工技术 [J]. *施工技术(中英文)*, 2021, 50(17): 112-115.
- [11] SUN W X, HAN F C, ZHANG Y M, et al. Experimental assessment of structural responses of tunnels under the groundwater level fluctuation [J/OL]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 137: 105138 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088677982300158X>.
- [12] CAGRI M, LI Y D, YORE R, et al. Stochastic modeling of groundwater drawdown response induced by tunnel drainage [J/OL]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106529 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379522200014X>.
- [13] SHI S S, GUO W D, LI S C, et al. Prediction of tunnel water inflow based on stochastic deterministic three-dimensional fracture network [J/OL]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 135: 104997 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779823000172>.
- [14] HOU C T, YANG X L. 3D stability analysis of tunnel face with influence of unsaturated transient flow [J/OL]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: 104414 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779822000542>.
- [15] DONG X J, ALI K, QI C C, et al. Analytical solution for stress distribution around deep lined pressure tunnels under the water table [J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104124 [2023-12-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160918312504>.

## Optimization Study of Surface Precipitation Parameters for Water-rich Weakly Cemented Sandstone Tunnel

ZHAO Ziyu<sup>1</sup>, REN Yupeng<sup>2</sup>, DONG Yaobin<sup>2</sup>, CHEN Hongwen<sup>1</sup>, FAN Haobo<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Yinchuan Engineering Construction Command, China Railway Lanzhou Bureau Group Corporation, Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** Water-rich and weakly cemented sandstone strata have poor rock formation and very sensitive water stability characteristics, which are easy to destabilize into flow plasticity and cause disasters. In order to ensure the safety of tunnel construction, a tunnel project is relied on to carry out the optimization study of surface precipitation parameters. Through the combination of numerical model and field test, the influence of surface deep well precipitation time, spacing and pipe diameter on the groundwater level around the tunnel was analyzed. The numerical results show that: when surface ultra-deep wells are used for precipitation, the groundwater level in the sandstone formation first drops significantly and then gradually stabilizes. As the spacing of the descending wells decreases and the diameter of the descending wells increases, the groundwater level after stabilization of the descending water gradually decreases. From the effect of precipitation, the spacing of precipitation wells is the main factor affecting the groundwater level, and the experimental results are in good agreement with the numerical results. Taking multiple factors into consideration, the parameters of the ultra-deep well precipitation wells in sandstone formation are recommended to be: spacing of 16 m, diameter of 600 mm, and 90 d of pre-precipitation time. The research results can provide reference for the safe construction of water-rich sandstone tunnel.

**Key words:** water-rich sandstone tunnel; surface precipitation optimization; numerical simulation; spacing of precipitation wells; diameter of precipitation wells