赵本超，苏昆琨，蔡茂泽，等. 强降雨条件下某泥砂岩互层隧洞侧向变形机制研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(6)：149-161. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.013

ZHAO Benchao，SU Kunkun，CAI Maoze，et al. Study on the lateral deformation mechanism of a sandstone-mudstone interbedded tunnel under heavy rainfall conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2025，56(6)：149-161. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.013

强降雨条件下某泥砂岩互层隧洞侧向变形机制研究

赵本超[1,2]，苏昆琨[1,2]，蔡茂泽[3]，秦承志[3]，刘海宁[3]，裴书锋[3]，刘 亮[3]

(1. 河南省海河流域水利事务中心，河南 新乡 453000；2. 河南水投小浪底北岸灌区工程有限公司，河南 郑州 450003；3. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院，河南 郑州 450046)

摘 要：【目的】以小浪底北岸灌区水利枢纽工程为研究对象，旨在探究局部洞段开挖支护后的大变形现象，分析强降雨条件下砂泥岩互层隧洞围岩侧向变形机制，并提出合理的隧洞开挖支护措施。【方法】运用现场调查、现场监测和数值模拟相结合的研究手段，对不同工况下隧洞围岩侧向变形、塑性区特征以及支护单元受力状况展开研究。【结果】结果显示，初始工况下隧洞侧壁最大位移量相对较小，围岩基本稳定。降雨工况下，隧洞底脚侧向变形较大，钢拱架等支护设备破坏。降雨加支护工况下，侧壁最大侧向位移量几乎可以忽略，支护效果良好。【结论】隧洞侧向变形为渐进过程。9#隧洞围岩侧向变形机制如下：局部软弱岩层透镜体影响稳定性；强降雨入渗与农业灌溉致地下水位抬升，增加孔隙水压并降低围岩强度，致使原支护结构承载力不足，无法限制变形发展致其损坏并引发大变形。增设底部横向支撑可显著抑制围岩侧向变形，两侧底脚处效果明显，“增设底部横向钢支撑+沿洞周2 m注浆加固”的支护优化方案效果较佳。

关键词：软岩互层；隧洞；侧向变形；破坏机理；支护优化；监测模拟

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.013 **开放科学(资源服务)标志码(OSID)**：

中图分类号：TV523 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-0860(2025)06-0149-13



Study on the lateral deformation mechanism of a sandstone-mudstone interbedded tunnel under heavy rainfall conditions

ZHAO Benchao[1,2], SU Kunkun[1,2], CAI Maoze[3], QIN Chengzhi[3], LIU Haining[3], PEI Shufeng[3], LIU Liang[3]

(1. Henan Haihe River Basin Water Resources Management Center, Xinxiang 453000, Henan, China; 2. Henan Water Investment Group Xiaolangdi North Bank Irrigation Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China; 3. College of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China)

收稿日期：2024-07-26；**修回日期**：2024-10-15；**录用日期**：2025-01-09；**网络出版日期**：2025-05-09

基金项目：小浪底北岸灌区工程隧洞围岩变形失稳机理与高外水压力渗控关键技术研究与应用(20020183061)；2023年河南省重大科技专项(231100320100)；国家自然科学基金(42302276，52409157)

作者简介：赵本超(1989—)，男，工程师，学士，主要从事工程管理方向研究。E-mail：594092595@qq.com

通信作者：蔡茂泽(2000—)，男，硕士研究生，主要从事隧道工程研究。E-mail：cmz15769468544@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] The water conservancy project in the north bank irrigation area of Xiaolangdi was taken as the research object, aiming to explore the large deformation phenomenon after excavation and support of local tunnel section, analyze the lateral deformation mechanism of surrounding rock of sand-mudstone interbedded tunnel under heavy rainfall conditions, and put forward reasonable tunnel excavation and support measures. [Methods] By means of field investigation, field monitoring and numerical simulation, the lateral deformation of tunnel surrounding rock, the characteristics of plastic zone and the stress state of supporting unit under different working conditions were studied. [Results] The results show that the maximum displacement of the side wall of the tunnel is relatively small under the initial condition, and the surrounding rock is basically stable. Under the condition of rainfall, the lateral deformation of the tunnel foot is large, and the supporting equipment such as steel arch is destroyed. Under the condition of rainfall and support, the maximum lateral displacement of the side wall can be almost ignored, and the support effect is good. [Conclusion] The lateral deformation of the tunnel is a gradual process. The lateral deformation mechanism of surrounding rock of 9# tunnel is as follows: the lens of local weak rock layer affects the stability; heavy rainfall infiltration and agricultural irrigation caused the rise of groundwater level, increased pore water pressure and reduced the strength of surrounding rock, [Results]ing in insufficient bearing capacity of the original supporting structure, which could not limit the development of deformation and cause large deformation. Adding transverse support at the bottom can significantly inhibit the lateral deformation of surrounding rock, and the effect is obvious at the bottom feet on both sides. The support optimization scheme of 'adding transverse steel support at the bottom + grouting reinforcement along 2 m around the hole' is better.

Keywords: soft rock interbedded; tunnel; lateral deformation; failure mechanism; support optimization; monitoring simulation

0 引 言

在当今我国水利、交通等基础设施建设蓬勃发展的大背景下，隧洞、隧道等地下工程犹如城市与地区发展的脉络，不断延伸拓展。由于我国地质条件的复杂性和多样性，这些地下工程在建设过程中面临着诸多严峻的挑战。其中，软岩地层中的隧洞工程更是备受关注。软岩地层隧洞由于岩体强度差，隧洞开挖后围岩收敛变形量大，持续时间长，易出现断面侵限、塌方等工程问题，甚至会造成支护结构破坏，给隧洞开挖支护设计提出巨大挑战。深入研究软岩隧洞变形破坏机制及其支护设计，已成为软岩隧洞安全稳定建设的关键。

国内外众多学者为此付出了不懈的努力，进行了大量深入且系统的研究工作。丁秀丽等[1]基于丰富的工程实践案例，对隧洞围岩变形进行了细致的总结与分类，为后续研究奠定了坚实的基础。周航等[2]、李磊等[3]对杨家坪隧道大变形进行研究，发现变形段与隧道渗水密切相关，陈志敏等[4]通过对宁缠隧道围岩变形的治理，综合分析了地应力、地层岩性、节理及软化夹层、岩层产状对围岩稳定性的影响。在探究软岩隧洞变形的成因方面，通常认为低岩石强度开挖引发的塑性变形以及地下水对围岩的软化，二者共同起着主导作用[5]。对于层状软岩而言，其变形特征往往呈现出一定的方向性[6]。这是由于岩层的层理结构和岩石的各向异性所决定的。若存在多组岩层，围岩强度的差异性[7]会使得不同部位的变形程度不同，从而导致支护结构受力不均，增加了支护结构破坏的风险。郭庆昊[8]针对层状围岩开展的模拟研究，深入分析了不同层理间距、倾角、黏聚力和摩擦角对围岩变形以及支护结构受力的影响，为我们理解层状软岩的变形机制提供了有力的理论支持。值得注意的是，不同的岩土工程项目中，软岩互层这种地质条件存在一定的共性特征。软岩互层边坡[9-10]的失稳机理与软岩隧洞的变形机制有着诸多相似之处。在这两个领域，现场量测都具有不可替代的重要性[11]。通过现场量测，能够获取最真实、最直接的地质数据和变形信息，为理论分析和数值模拟提供可靠的验证依据，从而更加准确地揭示变形机制，制定有效的防治措施。

针对软弱含煤地层复合大变形问题，ZHU 等[12]通过机制分析提出双初级支护体系，为深部煤系地层隧道变形控制提供了结构优化方案。在支护结构可靠性预测领域，ZHANG 等[13]开发的 PG-GDL 方法将物理引导生成式深度学习应用于管幕隧道超前支护，实现了多维度变形预测精度提升。对于层状岩体隧道，MEI 等[14]基于离散元数值模拟揭示了软硬互层组合对变形模式的控制机制，证实软岩层位置对围岩稳定性具有决定性影响。环境因素方面，WANG 等[15]通过自主研发试验系统阐明降雨强度与历时对浅埋隧道围岩破坏模式的定量关联，而 YE 等[16]针对复杂地形石灰岩隧道，系统提出了管棚注浆、临时支护与双重初期支护的协同加固体系，有效应对降雨诱发的塌方灾害。针对特殊岩土体隧道，

HONG 等[17]在软塑性黄土隧道工程中验证了超前排水与小导管注浆的联合控变效果，TANG 等[18]进一步揭示了黄土隧道水分入渗规律与结构响应间的动态耦合机制，据此构建的预警系统显著提升了施工安全性。值得注意的是，DENG 等[19]通过室内试验与数值模拟相结合的方法，定量评估了降雨入渗对浅埋黄土隧道稳定性影响，其成果为同类工程提供了重要理论支撑。这些研究进展共同表明，地质条件精细化判识、支护结构创新设计、环境因素动态监测的三维协同控制，是实现复杂隧道工程安全建造的关键技术路径。

在软岩地层隧洞的开挖支护设计领域，众多学者和工程技术人员也进行了广泛而深入的探索。WANG[20]等人提出了将复杂变形机制转换为单一类型的支护对策，为解决软岩隧洞支护问题提供了新的思路。在国内大部分隧洞工程中，主要的支护设计理念侧重于大量监测[21-21]和多次支护[23-24]。这是因为软岩地层的变形具有不确定性和复杂性，只有通过持续的监测和及时的多次支护调整，才能有效地控制围岩变形，保障隧洞的稳定。联合支护体系在软岩隧洞支护中得到了广泛的应用。王永刚等[25]、于家武等[26]、张立鑫等[27]以木寨岭隧道为依托，提出了以锚索系统为主的复合型初期支护体系。张红军等[28]、杨晓杰等[29]则提出了“锚网梁索喷+锚注”“锚网索+底脚锚杆+柔层桁架”等支护方案。这些方案充分考虑了软岩的特性和工程的实际需求，在实践中取得了良好的效果。这一领域目前面临着软岩隧洞变形破坏机制认识不够深入全面，导致支护设计方案针对性和有效性不足的难题。同时，在复杂地质条件下，精准把握支护时机和优化支护参数等方面仍存在困难。

本文基于小浪底北岸灌区水利枢纽工程，采用现场调查、现场监测和数值模拟相结合的研究方法，对砂泥岩互层隧洞围岩侧向大变形破坏特征和形成机制进行深入研究。通过现场调查，获取第一手的地质资料和工程实际情况；借助现场监测，实时掌握围岩变形的动态数据；利用数值模拟，对复杂的地质力学过程进行模拟和分析。最终提出合理的防控措施，旨在为相似软岩隧洞大变形的防治提供切实可行的技术参考，推动我国软岩地层地下工程建设的安全、高效发展。

1 工程概况

小浪底北岸灌区工程位于河南省黄河北岸，是黄河小浪底水利枢纽的配套工程，工程区域包括河南省济源市和焦作市的沁阳市、孟州市、温县、武陟县等地。多年平均引黄量 2.39 亿 m^3，属于大(2)型灌区。主要建设内容为新建或续建改造渠道 32 条，总长 325.24 km；新建、改建各类建筑物 696 座。其中总干渠全长 22.4 km，新建隧洞 12 条。研究洞段为总干渠 9# 输水隧洞，大变形段埋深 20.6 m，全长 1 798.2 m，断面为城门洞型，设计尺寸 4.2 m×5.5 m(宽×高)，采用机械臂全断面法开挖，开挖进尺 1~2 m，采用系统锚杆、钢拱架、挂网喷射混凝土的联合支护方式。系统锚杆杆体为 ϕ20 mm 螺纹钢筋，长度 2 m，间距 1 m，梅花形布置；喷射 C20 混凝土面层厚度为 150 mm；钢筋网直径为 6 mm，间距为 200 mm。钢拱架间距 1 m，采用国际 14 工字钢，支护示意图如图 1 所示。在隧洞边墙布置三道位移监测线，测线布置如图 2 所示，第一道测线 A 为两侧拱脚连线，第二道测线 B 为底脚上部 1.5 m 处边墙连线，第三道测线 C 为边墙底脚连线。

隧洞上覆第四系中、重粉质壤土，黄土厚度变化较大(15~40 m)，属弱透水性，富水性较差。隧洞围岩为泥岩、砂岩互层，岩体倾向 NE，倾角 25°~30°，与洞线夹角 50°~60°，局部发育有层状软弱砂岩，层厚 1~2 m，呈透镜体状，如图 3(b)所示。组成洞室围岩的古近系泥岩、砂岩互层整体强度较低，自稳能力差，泥岩遇水易崩解。砂岩成岩差，手捏易碎，局部相变为砂质泥岩，易碎裂松动。隧洞围岩总体等级为 V 级，开挖后易产生挤压变形。9# 隧洞地质剖

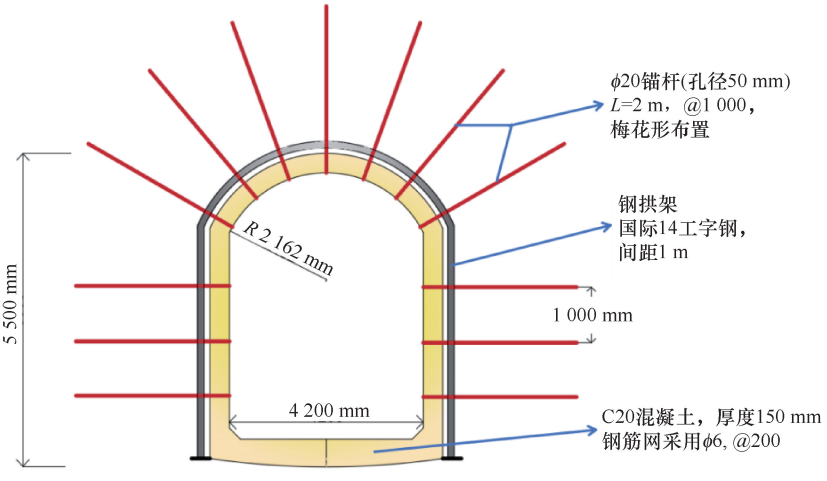


图 1 支护示意

Fig. 1 Support setup diagram

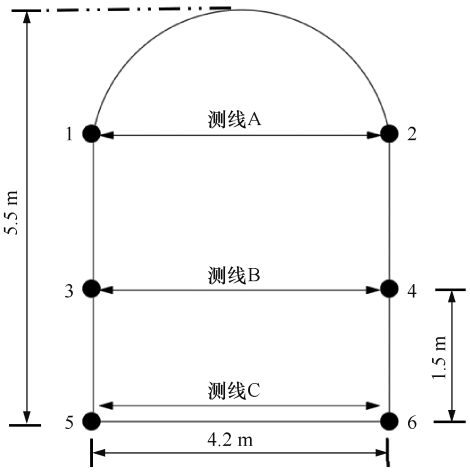


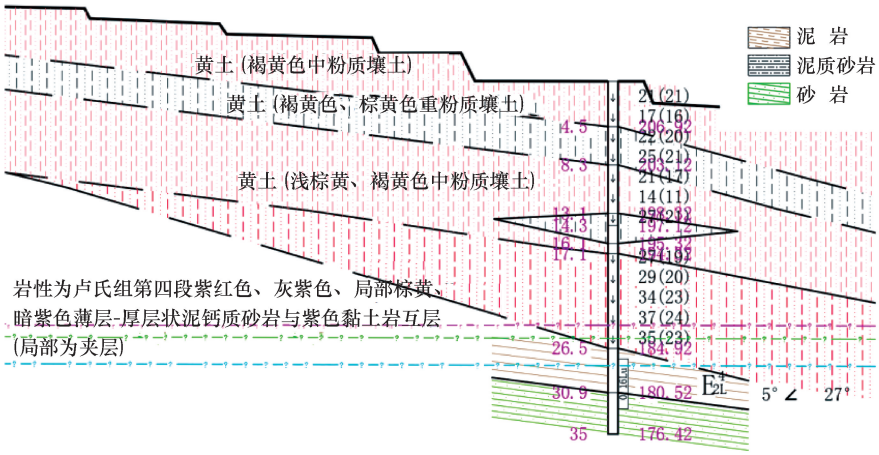
图 2　监测点示意

Fig. 2　Schematic diagram of monitoring points

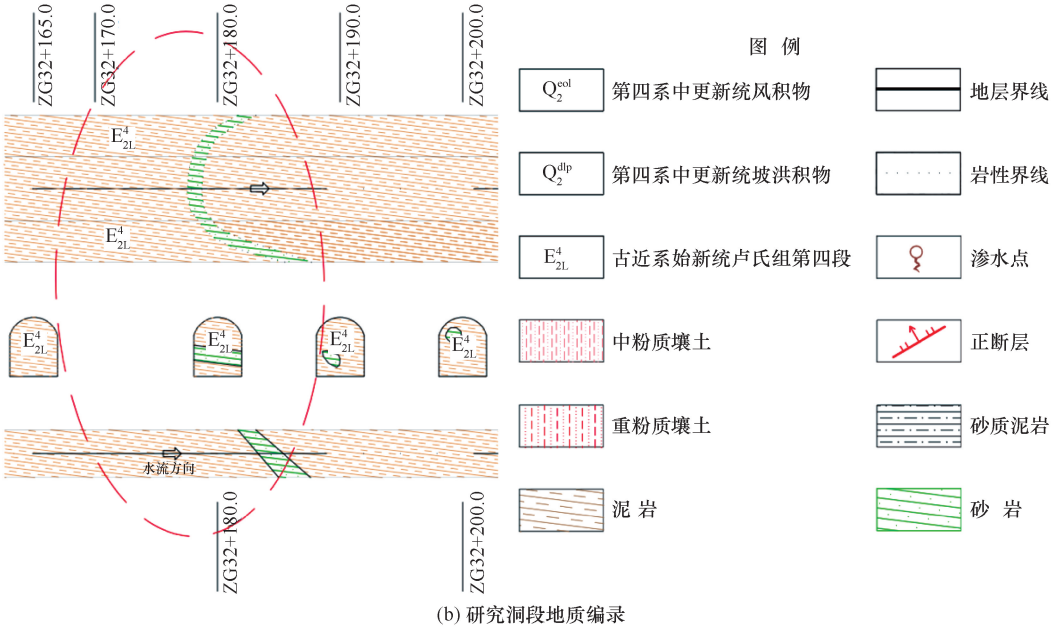
面图如图 3(a)所示。

2　隧洞围岩侧向大变形过程

自 2020 年 6 月中旬始，工程所在地济源市进入雨季，气象局多次发布暴雨预警，连续一周降雨量超过 50 mm，较往年同期均值偏多两成以上。2020 年 3 月至次年 3 月的月均降雨量与隧洞最大收敛变形量如图 4 所示，累计降水量达到了 621 mm，已有的观测数据显示，研究区的地下水位上升了 3 m，降雨量与水位变化均远超往年平均水平。至同年 9 月，隧洞底脚出现破坏，又因农业灌溉，周边浇水灌溉再次补给地下水。考虑到农业灌溉每年均在进行，分析隧洞边墙侧向大变形的主要原因还是降雨引起的地下水位上升导致，在地下水位上升过程中，围岩含水率逐渐增



(a) 9#隧洞地质剖面



(b) 研究洞段地质编录

图 3　地质剖面示意

Fig. 3　Schematic diagram of the geological profile

加，力学参数逐渐劣化，进而隧洞侧墙变形逐渐增大。由于岩体的累积劣化，其蠕变效应也会逐渐显现，但是整个围岩变形过程约 1 a 时间，围岩的蠕变作用不是特别显著。隧洞围岩侧向变形过程及支护如下。

（1）2020 年 9 月 7 日，经过变形监测，32 + 287.4—32 + 303.4 段（进洞 106.6 ~ 122.6 m，长 16 m）左侧钢拱架底脚出现较大变形，且变形量已经侵占隧洞二衬断面。2020 年 9 月底，采用补打锚杆、增加撑、增加排水孔、加强观测等措施，9#隧洞变形情况在一定时期内保持稳定。底脚破坏及支护如图 5 所示。

（2）2020 年 11 月中旬，钢拱架底脚往上约 1.5 m 处相继发生明显变形，部分洞段喷射混凝土有拉裂现象。2020 年 11 月 19 日，对变形洞段掌子面给出处理措施，包括增设锚杆、增加锚杆孔径、换用干钻法成孔、加强排水，对下部横撑变形较大或无横撑的，及时更换、增加、新设横撑为向下反拱形式，并及时跟进二衬支护。侧壁变形及加固如图 6 所示。

（3）2020 年 12 月 1 日，设总干渠 9#隧洞桩号 32+146—32+096 段（共 50 m）为试验段，该试验段隧洞采取以下方案进行支护：两侧拱架底脚加 14 号工字钢进行纵向连接；底部用无缝钢管作为地锚，并于管内注 M30 水泥砂浆。拱架两侧向洞壁做反拱，拱最大处为 15 cm。根据设计要求设置直径为 20 mm，长度不少于 6 m 的锚杆，单侧拱架底脚设置 2 根，起拱处设置 1 根，侧墙中间设置 2 根锚杆，斜向下 15°，采用干钻法扩孔。锚固材料采用锚固剂，保证补打锚杆与钢拱架连接牢固。进行隧洞底部保护层预留、钢拱架底部两侧开槽施工，一衬施工完成后回填至预留高程，并加强排水工作，保证施工环境干燥。

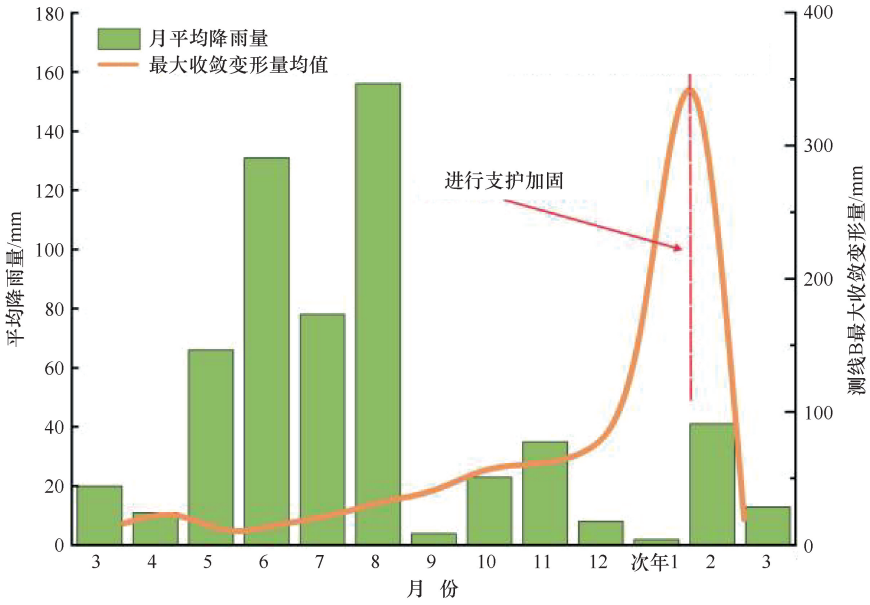


图 4　2020 年 3 月至 2021 年 3 月济源市月均降雨量与隧洞最大收敛变形量

Fig. 4　Monthly average rainfall and maximum convergence deformation of tunnel in Jiyuan City from March 2020 to March 2021

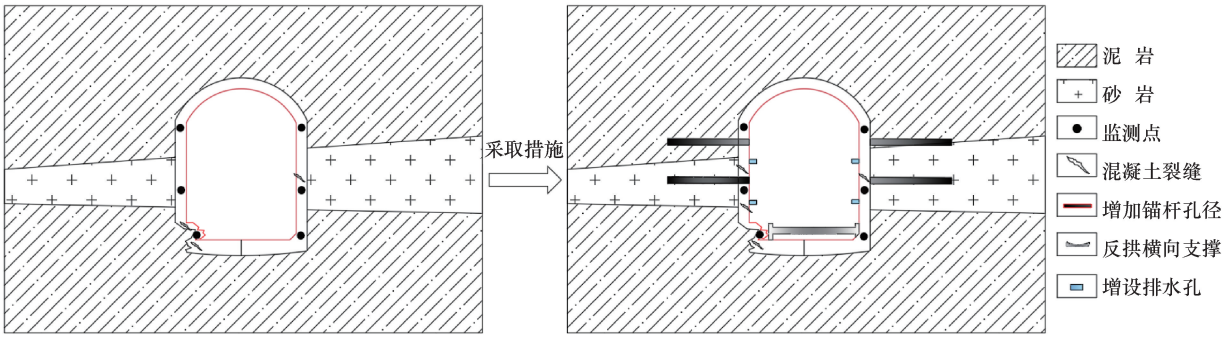


图 5　底脚破坏及支护示意

Fig. 5　Foot damage and support schematic diagram

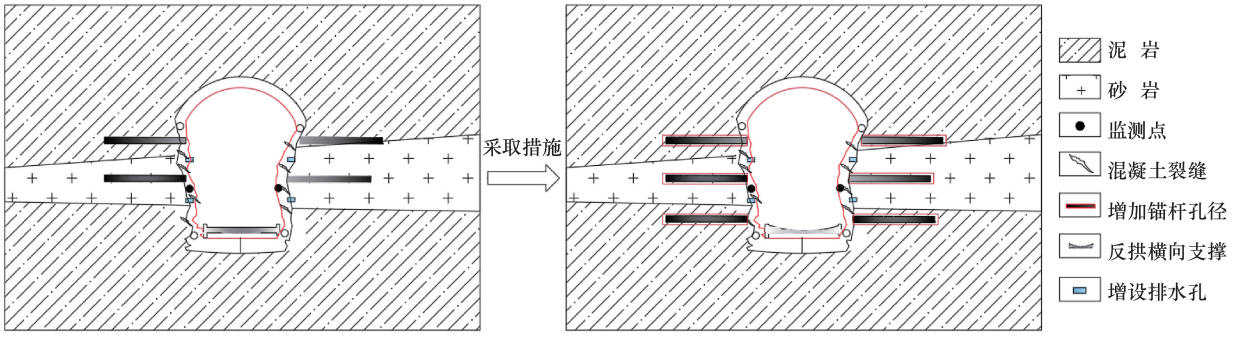


图 6　侧壁变形及加固示意

Fig. 6　Side wall deformation and reinforcement diagram

(4)2020 年 6 月工程区迎来长达一周的强降雨，经降雨入渗，次年 1 月 20 日的地下水位监测结果显示，工程区地下水位相较年前上涨 3 m 左右。发现在洞壁或掌子面局部有滴水现象，洞壁、洞顶呈潮湿状。2021 年 2 月 19 日，桩号 ZG32+280—ZG32+170 段变形加大，该段喷射混凝土局部产生裂缝，于 2 月 20 日晚上，施加简易横向支撑对其进行紧急支护。变形观测结果显示，截至 2021 年 2 月 24 日上午，测线 B 侧壁收敛变形量如图 7 所示，累计最大收敛变形量为 561 mm，近 3 天最大收敛变形量约 300 mm。监测结果显示，工程区围岩在地下水作用下发生蠕变，蠕变初期变形缓慢，由于强降雨引起的地下水位抬升削弱了围岩强度与承载能力，围岩加快进入加速蠕变阶段，变形急剧增大。后续对其紧急施加的横向支撑虽能一定程度限制变形，但因蠕变持续、围岩应力复杂且水-岩作用等不良因素未消除，变形仍有持续增大趋势，存在塌方风险。

(5)2021 年 3 月 4 日，对总干渠 9#隧洞桩号 32+290—32+160(共 130 m)进行应急处理，采取如下措施：分别在钢拱架底脚现状地面及现状地面以上 1.5 m 处采用 18 号工字钢进行横撑，两根横撑跨中采用 18 号工字钢焊接，处理顺序由该段隧洞下游桩号向上游桩号推进。加强观测。完成应急处理措施后，该段隧洞后续将重新开挖，开挖时同步一次支护保障施工安全，一次支护完成后进行永久支护，以确保隧洞长期使用的结构安全稳定。截至 3 月 7 日上午 10：00，9#隧洞变形段加固处理完成。截至 3 月 9 日观测数据显示加固处理洞段基本稳定，加固处理后测线 B 侧壁收敛变形量及累计收敛变形量如图 8 所示。监测结果显示，刚施加永久支护后，仍存在一定变形，后续逐渐趋于稳定。刚施加永久支护后有变形是多种因素综合作用的结果，一方面，在加固处理过程中，虽然采取了一系列有效的措施，但围岩应力的调整需要一个过程。隧洞在经历了前期的变形和破坏后，围岩内部的应力状态较为复杂。当永久支护施加后，围岩会对支护结构产生一定的压力，而支护结

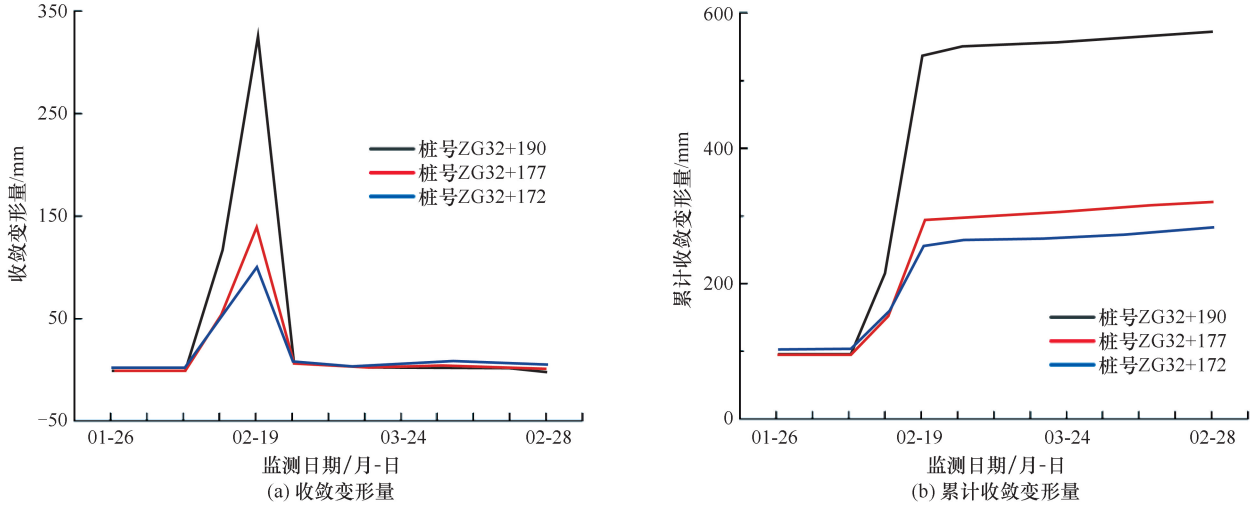


图 7　测线 B 侧壁收敛变形量

Fig. 7　Side wall convergence deformation of line B

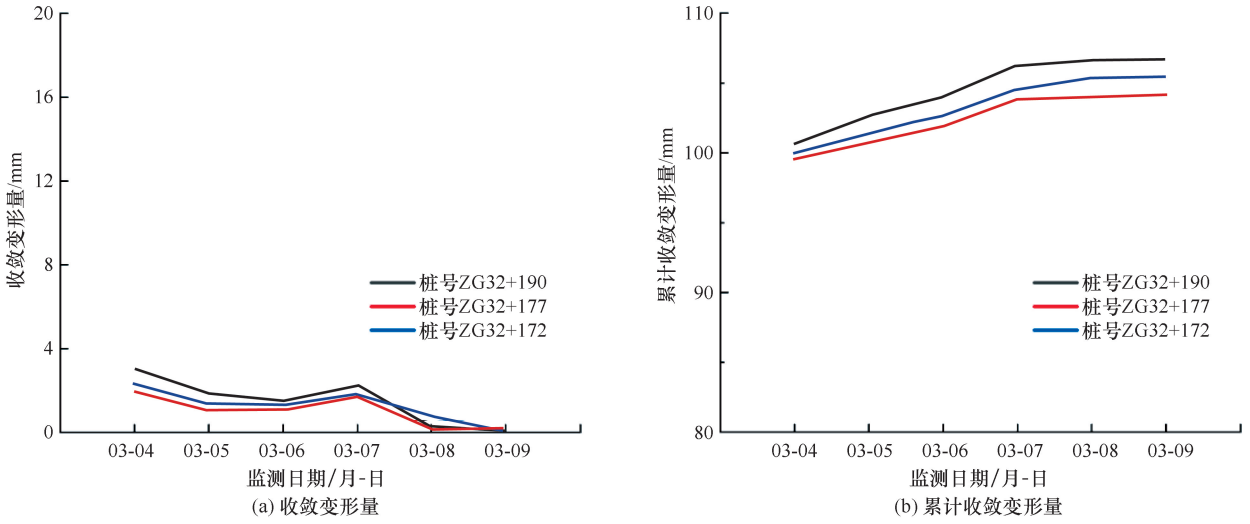


图 8　处理后测线 B 侧壁收敛变形量

Fig. 8　The convergence deformation of the sidewall after treatment of line B

构也会对围岩产生反作用力，这个相互作用的过程会导致一定的变形。另一方面，永久支护材料本身也可能存在一定的弹性变形和徐变。监测结果显示本次支护效果较佳。

3　隧洞围岩侧向变形机制

3.1　隧洞围岩侧向变形形成原因分析

综合考虑各方面因素，9#隧洞变形形成原因总结如下。

(1)地质方面：9#隧洞 ZG32+170—ZG32+280 段洞室围岩主要为古近系泥岩、砂岩互层，围者工程地质分类为 V 类，泥质弱胶结，成岩差，强度较低，属软岩，局部极软岩，接近弱膨胀岩，遇水易崩解、泥化脱落，易碎裂松动，自稳能力差，局部围岩发育裂隙相互交错，极不稳定。

(2)地下水方面：2021 年 1 月 20 日左右进入农业灌溉以来，在洞壁或掌子面局部有滴水现象，洞壁、洞顶出现潮湿现象。山体顶部及周边近期浇水灌溉现象较为普遍，对地下水进行了补给，洞内渗水量明显，较正常施工期偏大，地下水沿裂隙涌入施工段。

(3)施工扰动方面：ZG32+170—ZG32+280 段自发现收敛变形较大时，及时采取了增加 14 号工字钢底撑的加固措施，经过一定的观测周期后，收敛变形逐步趋于稳定。然后续施工机械设备频繁的进出对下部底撑造成了局部扰动或破坏，对底部支撑稳定造成一定影响。

综上所述，2021 年 1 月 14 日以来，洞内渗水量加大，造成洞底围岩软化，同时底板支撑受施工扰动影响，对拱架底脚约束减弱，受力平衡破坏，洞底横撑受围岩约束减弱，引起一定的变形，造成两侧围岩随拱架向洞内变形。

3.2　数值模拟

3.2.1　三维数值模型

建立 9#隧洞桩号 ZG32+180—ZG32+170 局部变形洞段的三维数值模型，研究初始、降雨及降雨加补强支护三种工况下隧洞围岩侧向变形特征，此三种工况均考虑了初期支护作用，其中补强支护为施做 2 m 注浆圈加内部横撑，支护作用用 FLAC3D 软件中的支护单元实现。隧洞模型尺寸为 84 m×10 m×70 m(X 方向×Y 方向×Z 方向)，隧洞位于模型中间，模型底部距隧洞底板 34.5 m，模型顶部为 20 m 厚黄土。隧洞附近网格进行局部加密，侧墙变形监测点与实际监测点一致。建立模型如图 9 所示。考虑到降雨引起的地下水位变化，进而导致岩体变形、强度参数的变化，故而采用岩体力学参数劣化来表征降雨影响。天然状态和饱和状态下泥砂岩三轴压缩试验应力应变曲线如图 10 所示[30]，可见饱和状态下泥砂岩峰值强度和弹性模量均有显著降低，饱和状态下泥质砂岩弹性模量为天然状况下的 50%~70%，峰值强度约为天然状况的 50%~75%。同时考虑了地下水位上升引起的孔隙水压变化。

岩土体本构模型采用理想弹塑性本构模型 Mohr-Coulomb 准则，岩体物理力学参数根据原位试验数据进行试算，结合现场监控量测数据进行修正，同时考虑施工阶段工程区地下水影响，对参数进行折减，

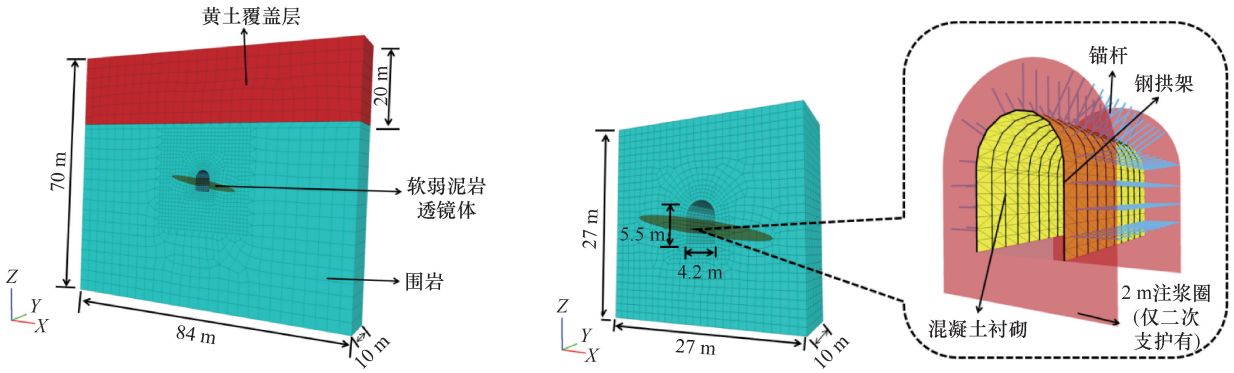


图 9　三维数值模型

Fig. 9　3D numerical model

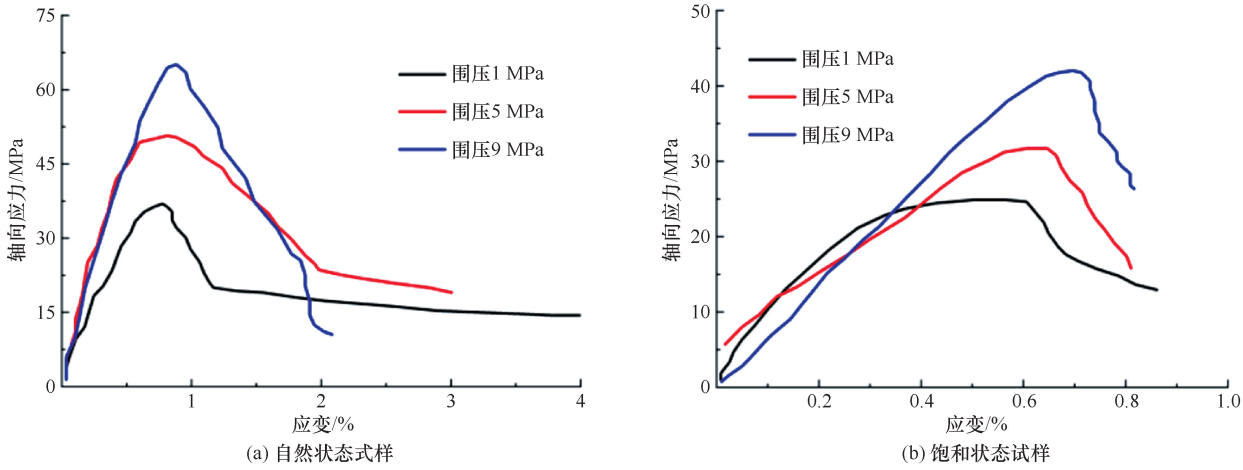


图 10　不同围压下泥质砂岩的应力应变曲线[30]

Fig. 10　Stress-strain curves of shaly sandstone under different confining pressures[30]

岩土体力学参数如表 1 所列。考虑锚杆、喷射混凝土和钢拱架等支护作用，钢筋网作用等效到喷射混凝土中，支护采用弹性模型，其力学参数如表 2 所列。

表 1　围岩物理力学参数

Table 1　Physical and Mechanical Parameters of Surrounding Rock

工　况	围　岩	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
天然工况	黄土覆盖层	1.22	0.48	154	31
	围　岩	1.21	0.44	156	33
	软弱泥岩层	1.01	0.26	98	26
降雨工况	黄土覆盖层	0.58	0.33	63	22
	围　岩	0.56	0.29	58	24
	软弱泥岩层	0.34	0.15	39	21

选取典型断面 ZG32+168(模型 $Y=2$ m)处边墙收敛变形曲线进行对比验证。对水位抬升 3 m 后开挖直至贯通过程中侧墙腰水平收敛变形进行监测，监测断面侧墙水平位移对比如图 11 所示，实际施工中断

表 2　初期支护计算参数

Table 2　Calculation parameters for initial support

支　护	弹性模量/MPa	泊松比	重度/kN·m^{-3}	喷射混凝土厚度/mm	抗拉强度/MPa
锚　杆	2×10^5	—	—	—	270
喷射混凝土	1×10^3	0.2	2.4×10^4	150	—
钢拱架	2.1×10^5	0.2	—	—	—

面最大位移出现在约开挖进尺 8 m 处，模拟计算出现最大变形为开挖进尺约为 9 m 处，最大收敛值约 250.55 mm，与实际监测收敛位移量相比，误差约 2%，与实际监测基本一致，因此该模型建立较为合理，能够较好反映现场实际工况。

3.2.2　计算结果

图 12 为水位抬升 3 m 后隧洞周围孔隙水压力分布情况，水位抬升后隧洞侧墙位移增加。图 13 为三种工况下隧洞围岩位移云图，初始工况下隧洞侧壁变形量几乎可以忽略不计，最大侧向位移量为 16.43 mm，降

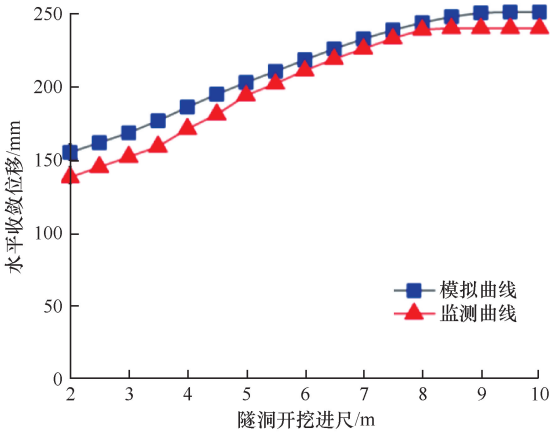
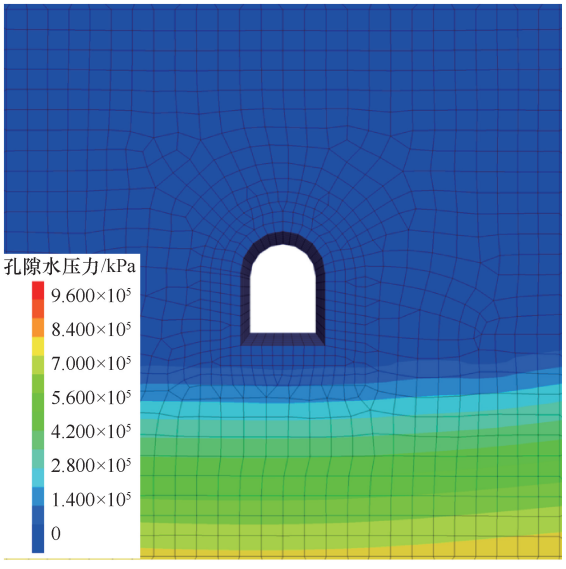
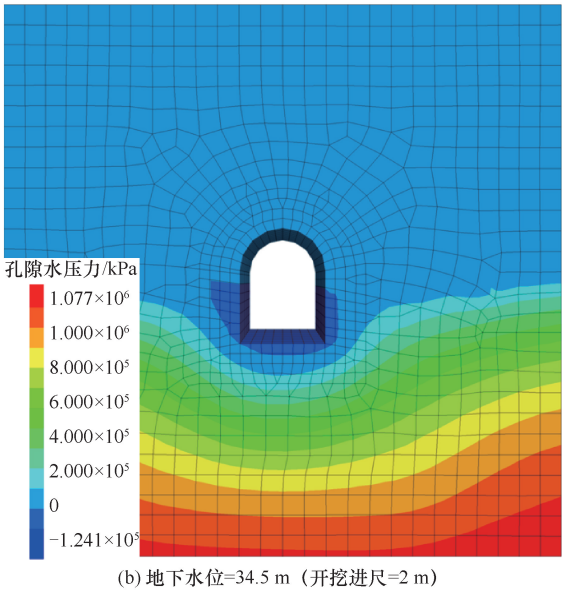


图 11　监测断面侧墙腰水平收敛位移对比(水位抬升后)

Fig. 11　Comparison of horizontal convergence displacement of monitoring sections(after the water level rises)



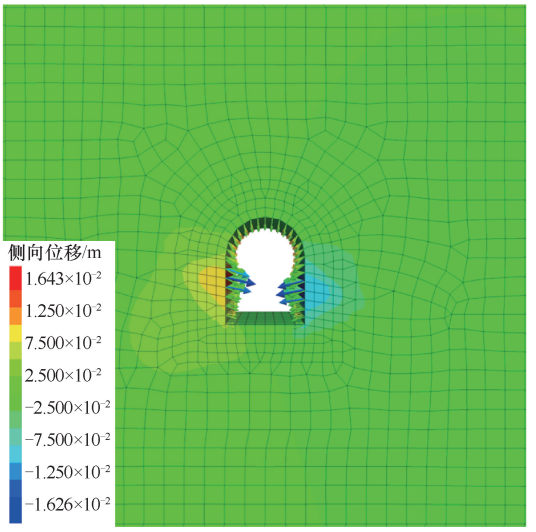
(a) 地下水位=31.5 m（开挖进尺=2 m）



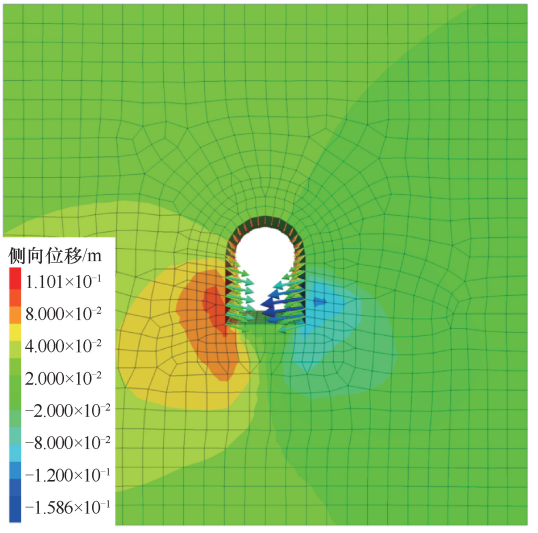
(b) 地下水位=34.5 m（开挖进尺=2 m）

图 12　孔隙水压力云图

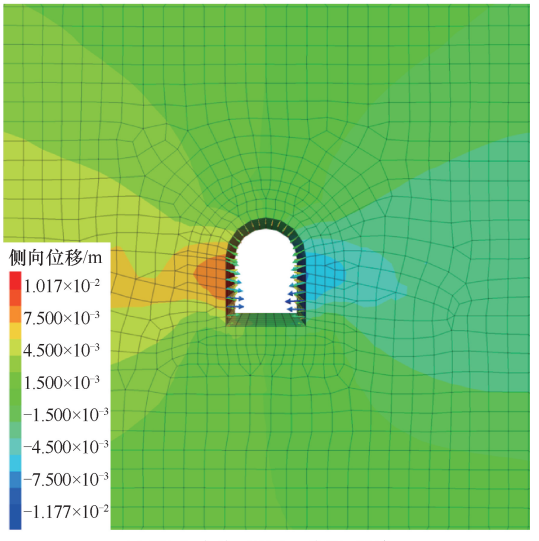
Fig. 12　Pore water pressure cloud map



(a) 初始工况-仅做初期支护



(b) 降雨工况-仅做初期支护



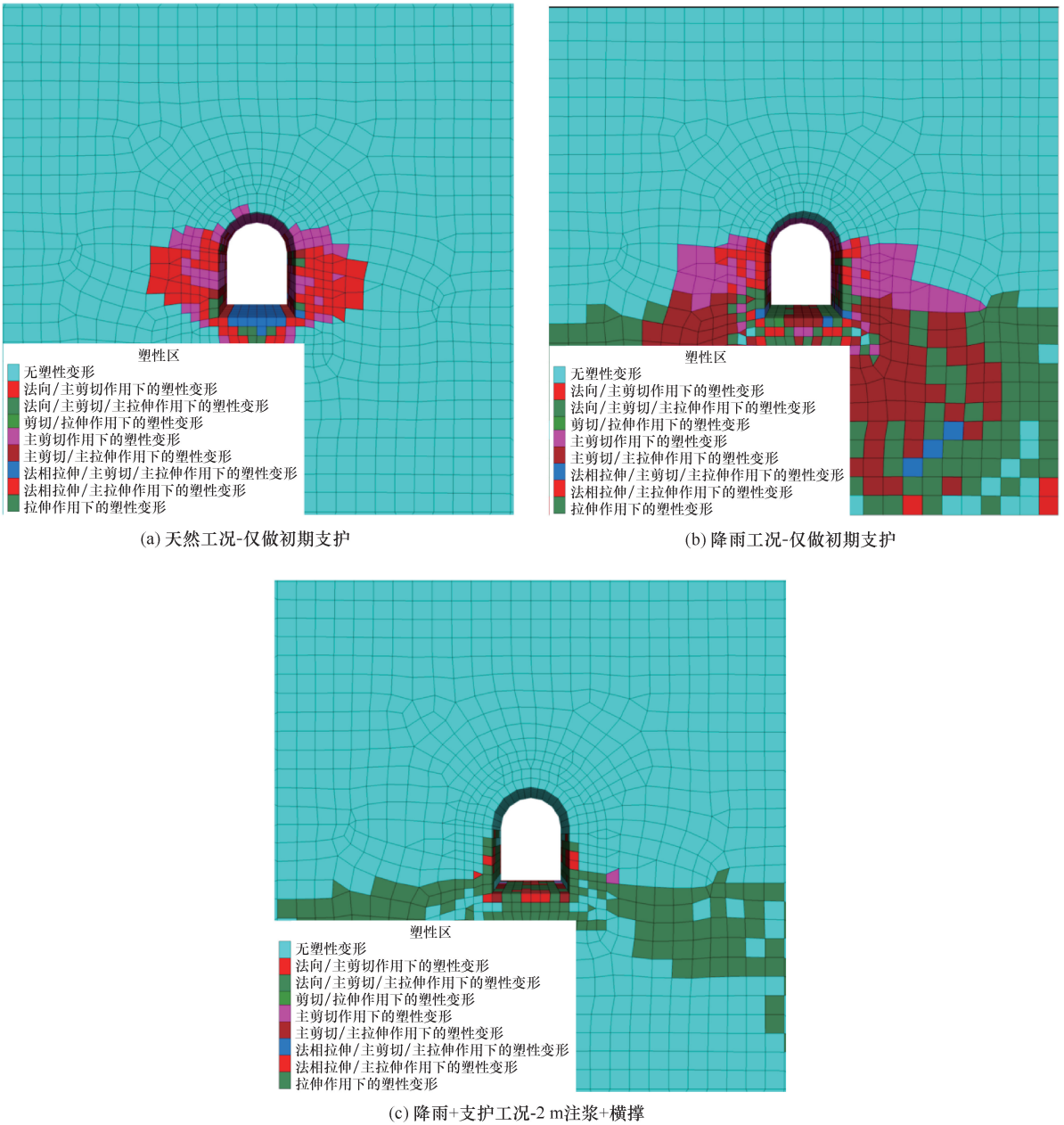
(c) 降雨+支护工况-2 m注浆+横撑

图 13　天然工况、降雨工况、降雨+支护工况下隧洞开挖后围岩侧向位移

Fig. 13　Lateral displacement of surrounding rock after tunnel excavation under natural condition, rainfall condition and rainfall + support condition

雨工况下，隧洞底脚侧向位移量达到 110.15 mm。降雨加支护工况下，隧洞侧壁位移有所降低，最大侧向位移量仅有 10.17 mm，支护效果良好。

三种工况下隧洞开挖后围岩塑性区如图 14 所示，初始工况下，塑性区主要集中于隧洞围岩侧壁与底板，最大塑性区深度最大约 5.2 m，隧洞两帮塑性区较发育，多表现为受拉破坏，底板多表现为拉剪破坏。降雨工况下，受地下水抬升影响，隧洞围岩塑性区分布范围急剧增大，向底板下方大幅延伸，表现为显著的受拉破坏，底脚延伸则表现为拉剪破坏。在浅埋隧洞工程中，降雨工况下塑性区集中于底板及其下大部分区域。这主要是因为浅埋使得降雨入渗路径缩短，雨水能快速到达隧洞底部区域，进而孔隙水压力急剧上升，根据有效应力原理，有效应力减小，围岩强度和承载能力降低而进入塑性状态。同时，上覆岩层压力小，初始应力状态简单，降雨入渗对围岩应力状态影响显著。隧洞底部区域原本应力小，易被雨水打破应力平衡，且埋深小导致侧向约束弱，易在雨水作用下变形。雨水还会软化软弱围岩，使其强度进一步降低，变形增大。在隧洞破坏过程中，先是由于围



(a) 天然工况-仅做初期支护

(b) 降雨工况-仅做初期支护

(c) 降雨+支护工况-2 m注浆+横撑

图 14　天然工况、降雨工况、降雨+支护工况下隧洞开挖后围岩塑性区

Fig. 14　Plastic zone of surrounding rock after tunnel excavation under natural condition, rainfall condition and rainfall + support condition

岩变形出现漏水现象，接着进入小变形阶段，随后随着上述因素持续作用，隧洞进入大变形阶段，最终可能引发断面侵限、塌方等严重破坏，给隧洞安全带来严重威胁，也为支护设计提出巨大挑战。添加支护后，隧洞围岩塑性区范围减小，多表现为受拉破坏，底板下方受拉破坏区相较未支护工况明显减少。

综上可知，初始工况下塑性区深度较小，隧洞围岩侧壁基本处于稳定状态；降雨工况下围岩力学参数劣化严重，塑性区急剧增加，向地底大范围延伸；施加二次支护后塑性区相对减少，围岩保持稳定。

三种工况下支护单元受力如图 15 所示，不难发现，仅第一排锚杆接近洞壁部位受力较大，其他排锚杆受力较小，这是由于锚杆支护是在开挖过程中逐段施加。在隧道开挖的初期，由于围岩的应力重新分布，靠近洞壁的区域首先承受较大的压力。此时施加的第一排锚杆直接承担了来自围岩的大部分初始应力，起到了关键的支撑作用。随着开挖的进行，先施加的第一排锚杆持续抵抗围岩变形，轴力不断增大。而后续施加的锚杆，由于前面的支护结构已经在一定程度上限制了围岩的变形，使得传递到这些锚杆上的力相对较小。同时，随着距离洞壁的增加，围岩的变形逐渐减小，对锚杆的作用力也相应减弱。另外，在开挖过程中，围岩的应力释放是一个逐渐的过程。先开挖的部分应力释放较快，对第一排锚杆的作用更加明显。而后施加的锚杆在围岩应力释放相对较缓的阶段进行安装，受力自然较小。初始工况下，位于侧壁锚杆的拉力达到 1.39×10^5 N，侧壁部位钢拱架所受压力为 7.07×10^5 N。降雨工况下，位于侧壁锚杆的拉力达到 5.06×10^5 N，侧壁部位钢拱架所受压力为 1.27×10^6 N。注浆支护并添加横向支撑后，位于侧壁锚杆的拉力降低至 6.38×10^4 N，相较降雨工况有显著降低；侧壁部位钢拱架所受压力为 1.04×10^5 N，横向钢支撑所受压力为 6.22×10^4 N。支护结构所受的荷载显著降低，表明当前的支护体系有效地发挥了作用，对围岩的约束和支撑效果良好，使得围岩的变形和应力得到了有效的控制。

本工程围岩为砂泥岩互层，围岩级别为 V 级，同时伴有泥岩透镜体，隧洞围岩稳定性较差。初始支护下围岩强度尚可，砂岩中含有较多孔隙，胶结作用相对不充分，在构造面切割和风化作用影响下，围岩力学性状可能更差。但由于隧洞埋深较浅，岩体强度大于围岩压力，隧洞总体可处于稳定状态。

工程区连续强降雨使得地下水位明显抬升，砂岩泥岩互层地质体内孔隙水压显著增加，岩体抗剪强

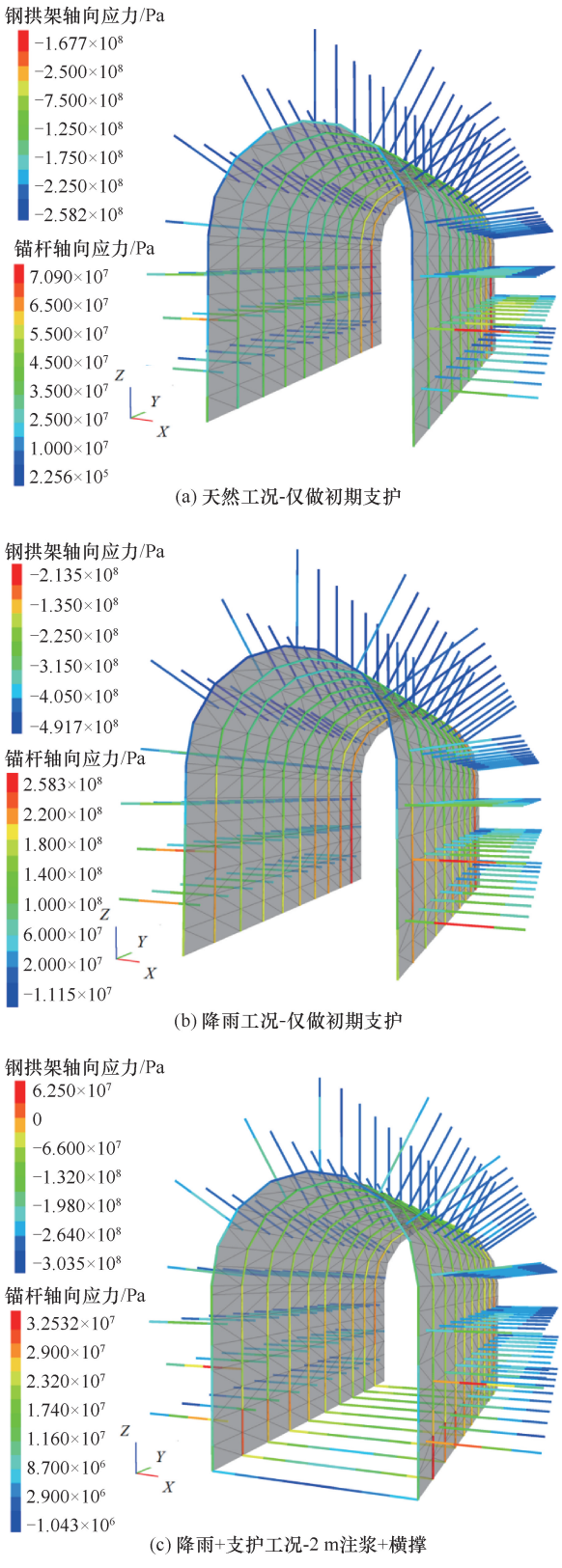


图 15　天然工况、降雨工况、降雨+支护工况下支护单元受力

Fig. 15　Force diagram of the support unit under natural working conditions, rainfall conditions, rainfall + support condition

度急剧减弱，伴随隧洞开挖，在应力集中和水位抬升

双重作用下，泥岩夹层几乎丧失强度和完整性，在围岩应力作用下破坏了初期支护构筑物，又经由开挖扰动等影响，引起侧向大变形。

3.2.3 隧洞开挖支护措施

根据小浪底北岸灌区 9#隧洞侧壁大变形过程及其先后采取的处治措施经验，结合数值模拟分析，提出强降雨条件下砂泥岩地层浅埋隧洞开挖支护措施如下。

(1)降排水。在隧洞开挖过程中，通过地表降水和洞内排水降低地下水位，并在地表和洞内设置排水设施。

(2)加固支护结构。鉴于地下水位抬升导致围岩强度劣化的问题，及时增设支撑、对侧壁混凝土衬砌，通过施加预压力或预张力，提高支护结构的整体稳定性和抗变形能力，特别适用于需要承受大荷载或复杂地质条件的隧道结构。

(3)现场监测。密切关注隧洞侧壁情况，除常规洞内位移、侧壁收敛变形和支护应力监测外，定期监测地下水位变化以及隧道周围地层的水文地质情况。

(4)工程管理与应急措施。合理安排工程进度，避免在连续降雨期间进行大规模开挖作业。建立科学合理的应急措施，若隧洞侧壁发生明显变形、涌水或者支护结构受损，立即停工，迅速采取措施，以最大限度地减少可能的风险和损失。在原有方案的基础上采取上述措施后，9#隧洞侧壁变形得到有效控制，实现了安全稳定开挖，隧洞已于 2021 年 9 月顺利贯通。

4 结 论

本文基于小浪底北岸灌区 9#隧洞工程，采用现场调查、现场监测和数值模拟相结合的研究方法，分析了不同工况下隧洞围岩侧向变形和塑性区特征，探究了砂泥岩互层隧洞围岩侧向变形机制，并提出了强降雨条件下隧洞开挖支护措施。主要结论如下。

(1)隧洞侧向变形是一个渐进过程，首先是涌水和底脚破坏，然后侧壁生成裂缝继而扩大，待支护单元所受应力超过其屈服强度，钢拱架破坏，最后形成侧向大变形。

(2)9#隧洞围岩侧向变形机制：局部软弱岩层透镜体影响围岩稳定性；强降雨与农业灌溉使地下水位抬升，增加围岩孔隙水压，降低围岩强度；随后开挖扰动进一步降低围岩整体承载力；且原支护结构承载力不足，无法限制变形发展，最终支护结构损坏，引发大变形。

(3)增设底部横向支撑能够显著抑制围岩侧向变形，在两侧底脚处效果尤为明显，采取“增设底部横向钢支撑+沿洞周 2 m 注浆加固”的支护优化方案，支护效果较佳。

参考文献(References)：

[1] 丁秀丽，张雨霆，黄书岭，等. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(3)：521-544.
DING Xiuli，ZHANG Yuting，HUANG Shuling，et al. Large deformation mechanism of surrounding rock of tunnel，prediction and application of extrusion large deformation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(3)：521-544.

[2] 周航，陈仕阔，刘彤，等. 复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究：以杨家坪隧道为例[J]. 工程地质学报，2022，30(3)：852-862.
ZHOU H，CHEN S K，LIU T，et al. Large deformation mechanism of soft rock surrounding tunnel deep buried in complex mountainous：A case study of Yangjiaping Tunnel [J]. Journal of Engineering Geology，2022，30(3)：852-862.

[3] 李磊，谭忠盛，郭小龙，等. 挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(2)：276-286.
LI L，TAN Z S，GUO X L，et al. Research on large deformation of tunnels with small intervals in squeezing steeply dipping phyllite strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(2)：276-286.

[4] 陈志敏，张赓旺，龚军，等. 宁缠隧道高地应力软岩大变形控制措施研究[J]. 隧道建设(中英文)，2023，43(S1)：398-406.
CHEN Zhimin，ZHANG Gengwang，GONG Jun，et al. Study on control measures of large deformation of soft rock with high ground stress in Ningchan Tunnel [J]. Tunnel construction，2023，43(S1)：398-406.

[5] 池建军，刘登学，丁秀丽，等. 第三系泥岩隧洞围岩大变形成因及应对措施[J]. 长江科学院院报，2022，39(10)：88-96.
CHI Jianjun，LIU Dengxue，DING Xiuli，et al. Causes and countermeasures of large deformation of surrounding rock of Tertiary mudstone tunnel [J]. Journal of Yangtze River Academy of Sciences，2022，39(10)：88-96.

[6] 张林. 砂岩泥岩互层地质隧道变形分析及控制技术研究[J]. 现代隧道技术，2020，57(S1)：1080-1085.
ZHANG L. Study on deformation analysis and control technology of tunnels in sandstone and mudstone interbedding [J]. Modern Tunnelling Technology，2020，57(S1)：1080-1085.

[7] 王志杰，蔡李斌，邱志洪，等. 土砂互层隧道大变形控制技术研究：以浩吉铁路阳城隧道为例[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(S2)：469-478.
WANG Z J，CAI L B，QIU Z H，et al. Large deformation control techniques of soil-sand interbedded tunnel：A case study of Yangcheng Tunnel of Haolebaoji-Ji'an railway [J]. Tunnel Construction，2021，41(S2)：469-478.

[8] 郭庆昊. 高地应力下层理对层状软岩隧道稳定影响研究[J]. 国防交通工程与技术，2023，21(2)：28-31.
GUO Q H. Influence of bedding on stability of layered soft rock tunnel

under high geostress[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2023, 21(2): 28-31.

[9] 邓安. 软硬互层顺层岩质边坡稳定性影响因素及失稳机理研究[J]. 采矿技术, 2023, 23(2): 24-28.
DENG An. Study on influencing factors and instability mechanism of soft hard interbedded bedding rock slope[J]. Mining Technology, 2023, 23 (2): 24-28.

[10] 周勇, 王旭日, 朱彦鹏, 等. 泥岩砂岩互层高边坡监测与数值模拟对比分析[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(1): 109-115.
ZHOU Y, WANG X R, ZHU Y P, et al. Contrastive analysis of monitoring and numerical simulation of high slope with interbed of mudstone and sandstone[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(1): 109-115.

[11] PAN F, CHENG S G. Analysis of deformation mechanism and control technology of soft rock tunnel with high geostress[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638/639/640: 794-797.

[12] ZHU B Z, ZHENG Y C, ZHANG J Y, et al. Mechanism analysis and treatment effect of compound large deformation in deep coal-bearing strata tunnel[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(9): 355.

[13] ZHANG C Y, PAN Y, CHEN J J. Image-based prediction for enclosure structure deformation in pipe-roof tunnel construction using a physical-guided and generative deep learning method[J]. Automation in Construction, 2025, 171: 106002.

[14] HU M L, WU S C, PU S J, et al. Deformation characteristics and stability analysis of soft-hard interbedded tunnels[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2025, 43(3): 134.

[15] WANG Y C, ZHENG S H, LI Y L, et al. The failure characteristics around shallow buried tunnels under rainfall conditions[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2021, 12(1): 363-380.

[16] YE F, JIANG Y, WEN X B, et al. Failure mechanism and countermeasures of limestone tunnel collapse due to rainfall under complex terrain: A case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108288.

[17] HONG Q Y, LAI H P, LIU Y Y, et al. Deformation control method of a large cross-section tunnel overlaid by a soft-plastic loess layer: A case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4717-4730.

[18] TANG K J, LIU D D, XIE S H, et al. Analysis of loess water migration regularity and failure response of tunnel structure under rainfall environment[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6): 251.

[19] DENG X, CAO W, YANG D. Stability analysis of shallow loess tunnel considering rainfall infiltration[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 45-55.

[20] WANG S R, LI C L, LIU Z W, et al. Optimization of construction scheme and supporting technology for HJS soft rock tunnel[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(6): 847-852.

[21] 万飞, 谭忠盛, 马栋. 关角隧道F2-1断层破碎带支护结构优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 531-538.
WAN F, TAN Z S, MA D. Optimizing design of support structure for Guanjiao Tunnel in fault-rupture zone F2-1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 531-538.

[22] 李磊, 谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3593-3603.
LI L, TAN Z S. Characteristic and mechanism research for large deformation problem in squeezing-shattered soft rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3593-3603.

[23] 朱毅. 山区城市城乡供水一体化项目及其长距离输水管道建设难点分析[J]. 水利发展研究, 2025, 25(5): 86-90.
ZHU Yi. Analysis of the difficulties of integrated urban and rural water supply and long distance water transmission pipeline construction in mountainous areas[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(5): 86-90.

[24] 刘明, 张家铭, 周治平, 等. 红层软岩隧道围岩稳定性及支护时机研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 146-151.
LIU M, ZHANG J M, ZHOU Z P, et al. Analysis of the surrounding rock stability and supporting time of a soft rock tunnel in the red bed area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(3): 146-151.

[25] 王永刚, 丁文其, 刘志强, 等. 木寨岭隧道大变形分级标准与支护时机研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1116-1122.
WANG Y G, DING W Q, LIU Z Q, et al. Classification standard of large deformation and construction time of second lining in Muzhailing Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1116-1122.

[26] 于家武, 郭新新. 木寨岭公路隧道复合型大变形控制技术与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9): 1565-1576.
YU J W, GUO X X. Composite large deformation control techniques for Muzhailing Highway Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9): 1565-1576.

[27] 张立鑫, 陈丽俊, 陈建勋, 等. 单斜构造软硬互层围岩隧道变形特征及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 186-196.
ZHANG L X, CHEN L J, CHEN J X, et al. Deformation characteristics and treatment measures of tunnels in soft and hard interbedded surrounding rock with tilted stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 186-196.

[28] 张红军, 李海燕, 李术才, 等. 深部软岩巷道围岩变形机制及支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 955-962.
ZHANG H J, LI H Y, LI S C, et al. Deformation mechanism of surrounding rock and support technology in deep soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 955-962.

[29] 杨晓杰, 娄浩朋, 崔楠, 等. 软岩巷道大变形机理及支护研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(9): 1-6.
YANG X J, LOU H P, CUI N, et al. Study on large deformation mechanism and support of soft rock roadway[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9): 1-6.

[30] 朱杰. 不同卸荷条件下饱和泥质红砂岩力学特性及能量演化机制[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
ZHU J. Mechanical Properties and Energy Evolution Mechanism of Saturated Argillaceous Red Sandstone under Different Unloading Conditions[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.

（责任编辑　王　璐）