

## 断层带大纵坡隧道围岩变形控制及支护优化

刘英<sup>1</sup>, 折文刚<sup>2</sup>, 高宏治<sup>2</sup>, 王刚<sup>2</sup>, 王森<sup>2</sup>, 邱军领<sup>3\*</sup>

(1. 山西大同抽水蓄能有限公司, 山西 大同 037400; 2. 中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300451;

3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为探究断层带大纵坡隧道围岩变形控制及支护优化方法, 考虑泄洪排沙洞弧线段最大设计倾角、断层地质参数与锚杆、钢筋网等支护参数, 并参考圣维南原理控制模型边界, 采用有限元法, 建立了断层带大纵坡隧道施工支护的分析计算模型, 对围岩变形和支护结构受力进行计算与动态分析。结果表明: 断层带大纵坡隧洞围岩稳定性较差, 断层处围岩竖向位移相较于完整地层增大了0.8~1.5倍, 水平位移增大了1.0~1.2倍, 需结合工程实际加强大纵坡隧洞初期支护强度; 竖直方向架立钢拱架围岩压力控制效果优于垂直于隧道轴线方向, 增加钢拱架密度可有效降低钢拱架应力; 最优钢拱架架立方式下拱顶、拱底、边墙的最大位移比数值模拟结果分别减小17.80%、36.31%、18.54%。现场监测结果表明, 钢拱架支护效果显著。

**关键词:** 大纵坡隧洞; 断层带; 钢拱架支护; 数值模拟; 现场监测

**中图分类号:** TU455.7

**文献标识码:** A

## Deformation Control and Support Optimization of Surrounding Rock in Large Longitudinal Slope Tunnel with Fault Zone

LIU Ying<sup>1</sup>, ZHE Wengang<sup>2</sup>, GAO Hongzhi<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>, WANG Sen<sup>2</sup>, QIU Junling<sup>3\*</sup>

(1. Shanxi Datong Pumped Storage Power Co., Ltd., Datong, Shanxi 037400, China;

2. China Railway 18th Bureau Group No. 5 Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** To investigate the deformation control and support optimization methods of surrounding rock in a large longitudinal slope tunnel with a fault zone, by considering the maximum design inclination angle of the arc section of the flood spillway tunnel, geological parameters of the fault, and support parameters such as anchor rods and steel mesh, and with reference to the Saint-Venant's principle to control the model boundary, the finite element method was used to establish an analysis and calculation model for the construction support of the tunnel. The deformation of the surrounding rock and the stress on the support structure were calculated and dynamically analyzed. The results show that the stability of the surrounding rock of the large longitudinal slope tunnel in the fault zone is poor. The vertical displacement of the surrounding rock at the fault increases by 0.8 to 1.5 times compared with the complete stratum, and the horizontal displacement increases by 1.0 to 1.2 times. It is necessary to strengthen the initial support strength of the large longitudinal slope tunnel in combination with the engineering practice. The control effect of surrounding rock pressure of steel arch erected in vertical direction is better than that in perpendicular direction. Increasing the density of steel arch can effectively reduce its stress. The maximum displacement values of the vault, arch bottom and side wall under the optimal steel arch erection method are reduced by 17.8%, 36.31% and 18.54% respectively.

收稿日期:2025-02-17 修回日期:2025-04-08

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-511);大纵坡龙落尾型隧洞施工关键技术研究(0-QT-2023-科技部-0-0012)

第一作者:刘英(1970—),男,湖北武穴人,硕士,高级工程师,从事水利水电工程管理工作。

\*通信作者:邱军领(1989—),男,山东潍坊人,博士,副教授,从事岩土与隧道工程方面的研究。

compared with the results of numerical simulation. The on-site monitoring results show that the steel arch support has a significant effect.

**Key words:** large longitudinal slope tunnel; fault zone; steel arch support; numerical simulation; on-site monitoring

断层带在隧道建设中愈发常见<sup>[1-3]</sup>。断层带岩体松散破碎、胶结差、节理发育,易引发大变形、涌水、坍塌等灾害<sup>[4-6]</sup>,亟需开展断层带隧道围岩力学行为与破坏特征研究,以揭示其变形规律并优化支护。

目前,学者对跨断层带隧道开展了大量研究。王天强等<sup>[7]</sup>通过模型试验揭示了衬砌裂纹扩展及纵、环向应变分布规律;刘国庆等<sup>[8]</sup>提出了可模拟围岩与断层间黏结、静接触、分离及滑动状态的动接触力算法;陈培等<sup>[9]</sup>针对掌子面稳定性提出了管棚支护参数设计方法;赵旭等<sup>[10]</sup>模拟了逆断层、走滑断层及倾向滑移断层黏滑错动下结构内力随错动距离的变化;陈海亮等<sup>[11]</sup>结合数值模拟与现场监测,揭示了不同断层宽度、倾角下的错动响应特征;Zhang 等<sup>[12]</sup>基于接触-摩擦界面单元理论,提出了断层影响区等效参数计算公式,分析了围岩位移、应力、塑性区及喷射混凝土衬砌应力的变化规律;Kiani 等<sup>[13-14]</sup>通过离心模拟试验,研究了断层厚度、倾角对隧道稳定性的影响及围岩破坏机理;万飞等<sup>[15]</sup>通过现场监测与数值模拟,优化了穿越断层带的支护方案。

针对断层带隧道围岩破坏机理及防治方案已有相关研究<sup>[16-18]</sup>,但尚不完善,尤其是穿越断层带大纵坡隧道的围岩变形控制方面。本文以山西某抽水蓄能电站大纵坡泄洪排沙洞为背景,采用有限元法开展4组钢拱架支护工况的数值模拟,分析围岩位移、应力及钢拱架应力,优化了钢拱架参数。研究成果对隧道安全、快速穿越断层带具有重要参考价值。

## 1 工程概况

山西某抽水蓄能电站泄洪排沙洞由引水渠、进水塔段、无压隧洞段等组成,其中无压隧洞段为“龙落尾”形式,弧线段最大倾角为 $39^\circ$ ,地质条件复杂,施工难度大,如图1所示。断层带由灰绿碎块和挤压蚀变岩组成,在泄洪排沙洞中部穿过,与洞向交角约为 $30^\circ$ 。为确保该区域的施工安全,需结合工程实际加强隧洞初期支护。

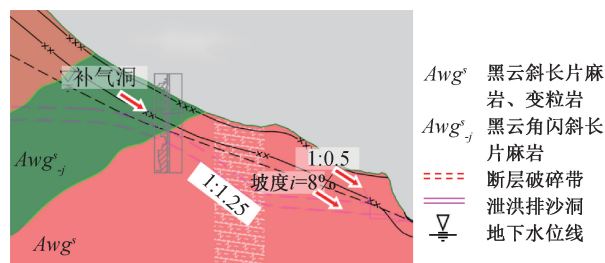


图1 泄洪排沙洞“龙落尾”段细部图

Fig. 1 Detailed drawing of the “dragon-drop tail” section of the flood spillway tunnel

## 2 数值模型建立

### 2.1 计算模型

本文依托的泄洪排沙洞设计倾角为 $39^\circ$ ,洞身自上而下开挖。基于圣维南原理,模型边界取3~5倍洞径,确定模型尺寸为 $80\text{ m}\times 90\text{ m}\times 18\text{ m}$ (对应 $x, y, z$ 方向)。根据穿越的地层条件,将断层厚度设置为 $4\text{ m}$ ,断层与水平方向夹角为 $30^\circ$ 且隧洞正向穿过断层带,在断层带中心设置监测断面,见图2(a)(c)。洞室净断面尺寸为 $7.5\text{ m}\times 10.5\text{ m}$ 。拱墙、底板采用 $\phi 25$ 砂浆锚杆,长度 $L$ 分别为 $4.5$ 、 $6.0\text{ m}$ ,间排距 $S$ 均为 $2\text{ m}$ 。钢筋网采用 $\phi 8@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ ,初期支护为 $10\text{ cm}$ 厚的C25喷射混凝土;二次衬砌为 $90\text{ cm}$ 厚C40混凝土,见图2(b)(d)。

本研究基于Midas GTS NX有限元平台建立数值模型,模型选用1D梁单元(模拟锚杆、钢拱架)、2D板单元(模拟喷射混凝土层)和3D实体单元(模拟地层、二次衬砌)。断层带按弱化材料法模拟<sup>[19-21]</sup>;钢拱架选用I 22a工字钢。地层及支护结构参数见表1。

### 2.2 工况模拟

隧洞初期采用锚杆、钢拱架和喷射混凝土支护,大纵坡泄洪洞在穿越断层带时会显著影响支护结构的稳定性,后续断面爆破开挖也会对断层带处的衬砌造成危害。本文设置4种工况(图3),通过调节钢拱架架立方向、间隔对断层带进行加固:工况1,垂直于隧道轴线间隔 $1\text{ m}$ 架立钢拱架;工况2,垂直于隧道轴线间隔 $0.5\text{ m}$ 架立钢拱架;

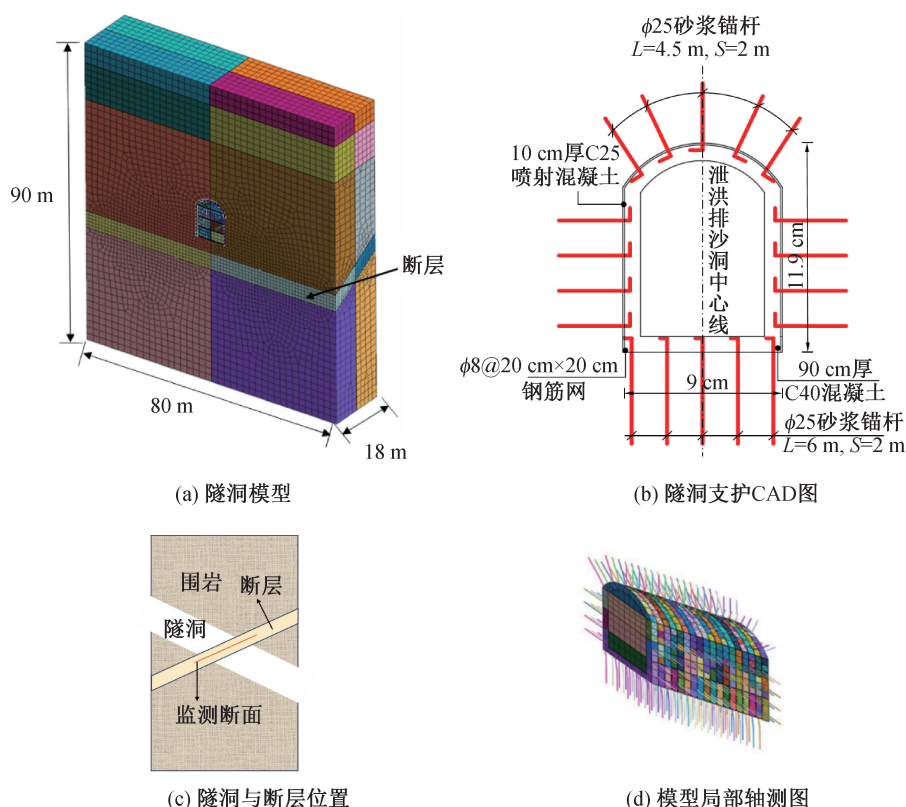


图2 模型建立及断层带位置分布

Fig. 2 Model establishment and distribution of fault zones

表1 地层及支护结构物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of strata and supporting structures

|      | 名称    | 厚度/m | 弹性模量/GPa | 天然重度/(kN · m <sup>-3</sup> ) | 泊松比  | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) |
|------|-------|------|----------|------------------------------|------|---------|----------|
| 地层   | 碎石土   | 6.0  | 1.18     | 18.9                         | 0.28 | 0.20    | 22.5     |
|      | 砂卵石   | 13.0 | 1.32     | 19.7                         | 0.32 | 0.30    | 24.0     |
|      | 片麻岩   | 61.0 | 3.68     | 23.5                         | 0.28 | 0.70    | 36.5     |
|      | 断带    | 4.0  | 0.50     | 17.5                         | 0.43 | 0.13    | 21.0     |
| 支护结构 | 钢拱架   | —    | 208.00   | 78.5                         | 0.16 | —       | —        |
|      | 喷射混凝土 | 0.1  | 26.00    | 24.0                         | 0.25 | —       | —        |
|      | 二次衬砌  | 0.9  | 32.50    | 25.0                         | 0.30 | 28.00   | 34.0     |
|      | 锚杆    | —    | 208.00   | 78.5                         | 0.16 | —       | —        |

工况3, 竖直(垂直于水平面)方向间隔1 m 架立钢拱架; 工况4, 垂直于隧道轴线+竖直方向间隔1 m 架立钢拱架。通过分析各工况初期支护后围岩位移及支护结构的应力变化规律, 优化钢拱架支护结构。

### 3 围岩及支护结构分析

本文通过分析4种工况下围岩变形、围岩应力、钢拱架应力分布规律, 评价不同钢拱架架立方式的加固效果。

#### 3.1 围岩位移特征分析

##### 3.1.1 围岩竖向位移

图4为不同工况下围岩竖向位移变化规律, 图

例中的正负号表示竖向位移方向(隆起为正、沉降为负)。改变钢拱架架立方式对围岩竖向位移规律影响不大, 仅调整了断层处明显位移变化区域的约束。隧洞施工接近断层带时, 围岩竖向位移明显增加, 且距离越近, 增幅越大。断层带中线处拱顶和拱底竖向位移最大, 边墙处竖向位移较小。由于隧洞存在倾角, 部分断层带围岩会沿隧洞轴线滑移, 使隧洞与断层带交界处下方的竖向位移明显增大。各工况拱顶最大沉降值分别为54.85、42.92、60.24、39.79 mm, 较完整地层增大0.8~1.4倍; 拱底最大隆起值分别为54.20、39.00、44.00、36.86 mm, 较完整地层增大1.2~1.5倍。

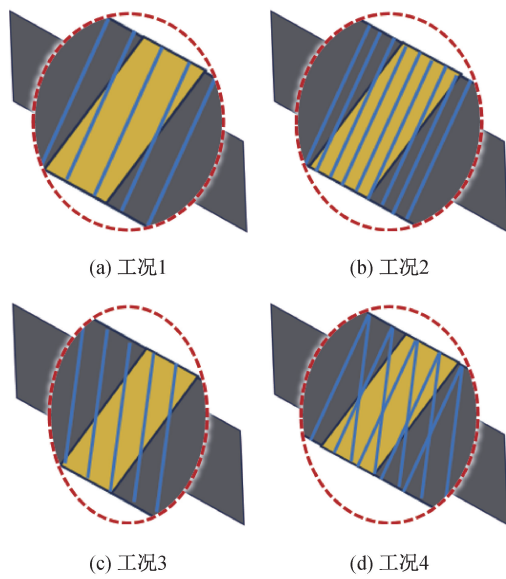


图3 模拟工况钢拱架架立方式示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of steel arch erection methods for simulation conditions

对比各工况竖向位移最大值发现,改变钢拱架架立方式对拱顶沉降的抑制效果明显优于拱底隆起。当钢拱架垂直于隧道轴线时,间隔由1 m 缩短至0.5 m 对隧洞竖向位移的改善效果较好;相同间隔下,垂直于隧道轴线架立钢拱架对拱底隆起抑制效果劣于竖直方向,但对拱顶沉降抑制效果优于竖直方向;竖直方向和垂直隧道轴线方向同时间隔1 m 架立钢拱架(工况4)对围岩竖向位移有一定的抑制效果。

为研究隧洞开挖后拱顶竖向位移规律,本研究沿开挖方向在拱顶处每隔1 m 布设1 个位移监测点。由各工况拱顶沉降变化规律(图5)可以看出,各工况拱顶处沉降值无明显波动。由于隧洞存在倾角,随着与洞口距离的增大,监测点埋深和拱顶沉降值均逐渐增大。断层带对其前方测点位移几乎无影响,但其后方围岩会沿隧洞倾角滑移,

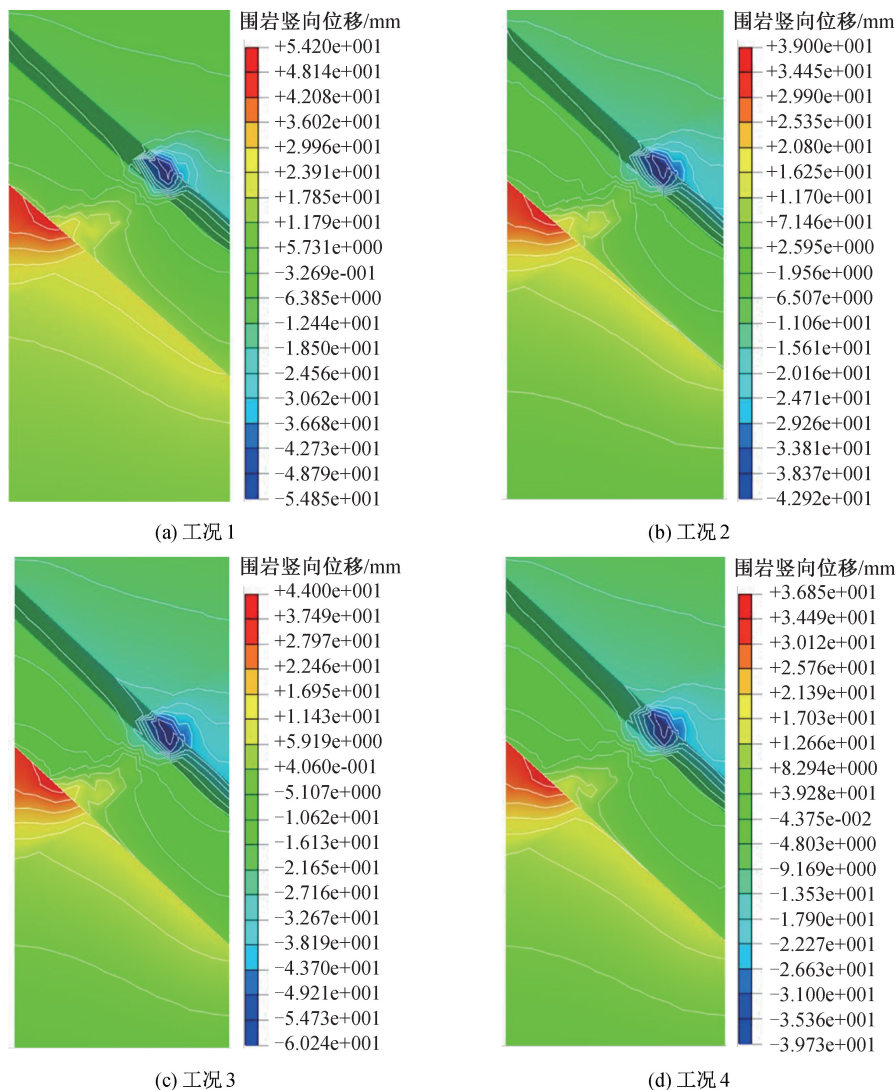


图4 各工况围岩竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement of surrounding rock under different working conditions

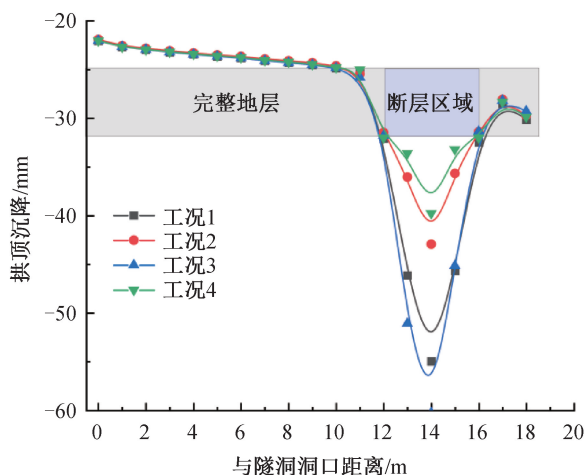


图5 各工况拱顶沉降曲线

Fig. 5 Vault settlement curves under different working conditions

使拱顶沉降值增大。开挖断层带区域时,拱顶沉降值大幅增加,在断层中线处达到最大值。

### 3.1.2 围岩水平位移

图6为不同工况下围岩水平位移变化规律。改变钢拱架架立方式未改变围岩水平位移的变化规律,仅对断层处水平位移明显区域的约束进行了调整。隧洞两侧边墙均向隧洞内收敛,接近断层时收敛明显加剧,且距离越近,收敛越显著。断层带中线处边墙中心的水平位移最大,拱顶和拱底均出现向隧洞内收敛的水平位移。断层带对周边围岩水平位移影响较小,位移主要集中在断层带范围内。

各工况下边墙水平位移的最大值分别为16.51、16.25、15.82、15.13 mm,相对完整地层增大

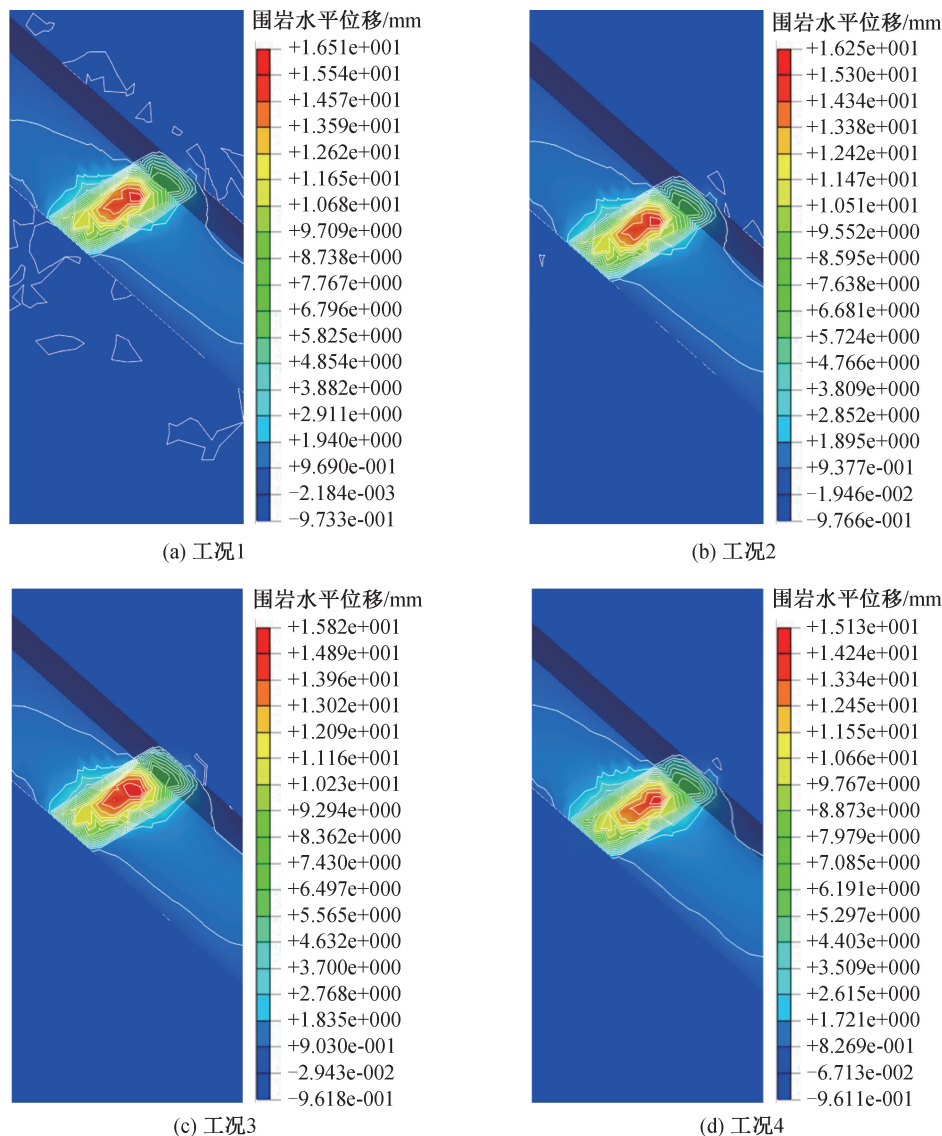


图6 不同钢拱架架立方式下围岩水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of surrounding rock under different steel arch erection methods

1.0~1.2倍。对比各工况水平位移最大值发现,当垂直于隧道轴线架立钢拱架时,钢拱架间隔由1 m缩短至0.5 m使边墙水平位移最大值减小了0.26 mm;相同间隔下,竖直方向架立钢拱架的边墙水平位移最大值较垂直于隧道轴线方向减小了0.69 mm;工况4对水平位移的控制效果最好。

为探究隧洞开挖后边墙水平位移的变化规律,本研究沿开挖方向在边墙处每隔1 m布设1个位移监测点。由边墙水平位移变化规律(图7)可以看出,各工况边墙处围岩的水平位移无明显波动。随着与洞口距离的增加,边墙收敛略有增大,断层带对其周边围岩水平位移几乎无影响。当开挖断层带区域时,边墙水平位移大幅增加,且在断层带中线处水平位移达到最大值。工况4对边墙水平位移的抑制作用效果最好。

### 3.2 围岩应力特征变化

图8为各工况下围岩应力的分布规律。围岩应力随隧洞埋深的增加而增大,接近断层带时迅

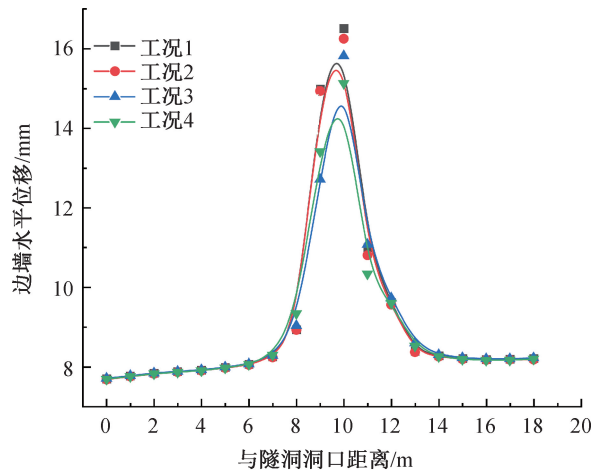


图7 各工况边墙水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curves of the side walls under different working conditions

速增大,在断层带中间达到最大值,而断层带下方围岩应力相对较小。边墙处于断层带中间,自断层带中间沿洞轴线向下游方向围岩应力显著减小,隧洞开挖对边墙外围岩的影响较小。

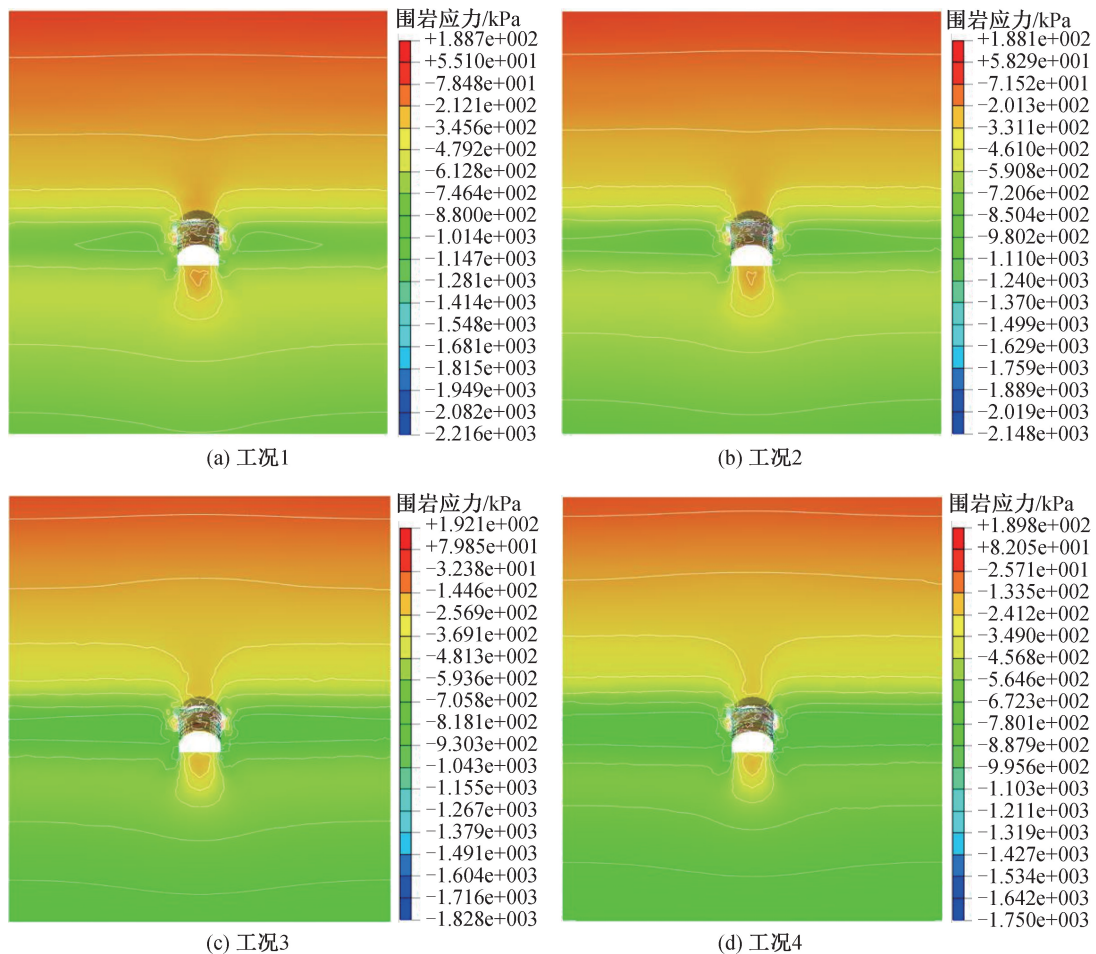


图8 各工况围岩应力分布

Fig. 8 Distribution of surrounding rock stress under different working conditions

拱肩处出现应力集中,且围岩应力达到最大值,各工况最大围岩应力分别为 2 216、2 148、1 828、1 750 kPa。拱肩处围岩塑性发生显著变化,围岩可能断裂,应及时支护避免隧洞失稳。对比各工况最大围岩应力发现,当垂直于隧道轴线架立钢拱架时,增加钢拱架密度对围岩应力控制效果并不理想;竖直方向架立钢拱架的控制效果优于垂直于隧道轴线方向;竖直和垂直方向同时间隔 1 m 架立钢拱架对拱肩处围岩应力的控制效果最好。

### 3.3 钢拱架应力特征变化

图 9 显示,钢拱架拱顶应力较大,且在断层带处增大尤为显著,因此,本文重点分析断层中线处的拱顶应力变化。受应力集中影响,工况 1 边墙处钢拱架应力有所增大,拱肩处变化较大(最大应力为 100 MPa),钢拱架最大应力出现在拱肩与拱顶中间,为 193 MPa;工况 2 各部位应力均有所减小;工况 3 边墙处应力均小于 40 MPa,钢拱架最大应力出现在拱肩与拱顶中间,为 165 MPa;工况 4 垂

直于隧道轴线的钢拱架拱顶应力较大,为 123 MPa,竖直方向则不超过 60 MPa。

## 4 支护结构优化与应用

基于数值模拟,得到各工况下围岩位移、钢拱架应力等力学响应指标,见表 2。工况 4 的支护方案能够有效约束沉降与水平位移,合理控制围岩应力,且钢拱架应力仍具有较大富余。因此,断层带初期支护方案选用工况 4,即垂直于隧道轴线和竖直方向间隔 1 m 架立钢拱架。

表 2 地层及支护结构物理力学响应指标

Tab. 2 Physical and mechanical response indicators of strata and supporting structures

| 工况   | 拱顶最大<br>沉降值/mm | 边墙水平位移<br>最大值/mm | 拱肩处围<br>岩应力/kPa | 钢拱架<br>应力/kPa |
|------|----------------|------------------|-----------------|---------------|
| 工况 1 | 54.85          | 16.51            | 2 216           | 193           |
| 工况 2 | 42.92          | 16.25            | 2 148           | 176           |
| 工况 3 | 60.24          | 15.82            | 1 828           | 165           |
| 工况 4 | 39.79          | 15.13            | 1 750           | 123           |

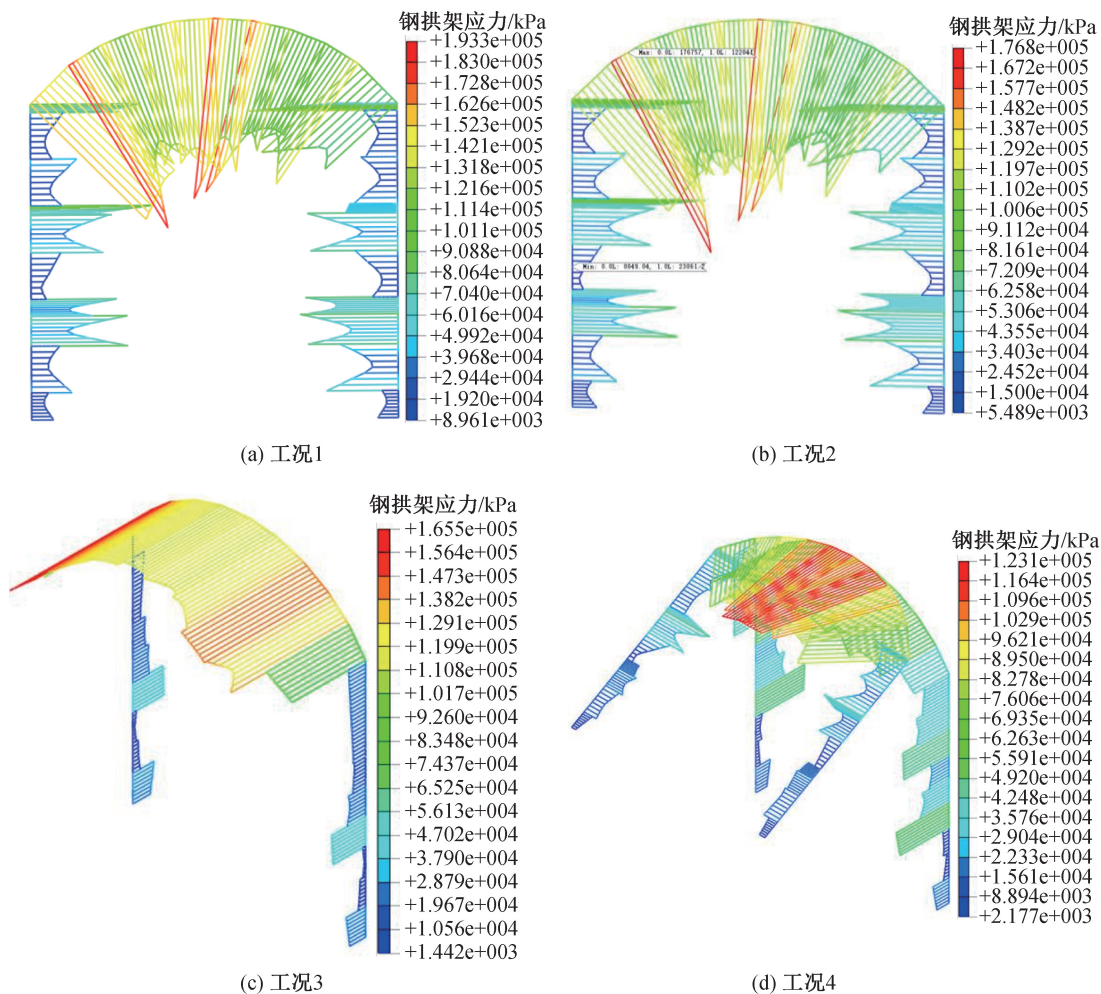


图 9 各工况钢拱架应力特征分布

Fig. 9 Stress distribution characteristics of steel arches under different working conditions

本文以山西某抽水蓄能电站泄洪排沙洞工程为例,采用工况4支护断层带。隧洞沿隧道轴线方向分层掘进,垂直和竖直方向钢拱架分层焊接(图10)。在断层中心断面布设监测仪器:左侧拱顶、拱肩和拱腰安装土压力盒监测围岩压力;拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底的钢拱架上焊接钢筋应力计,监测钢拱架应力。

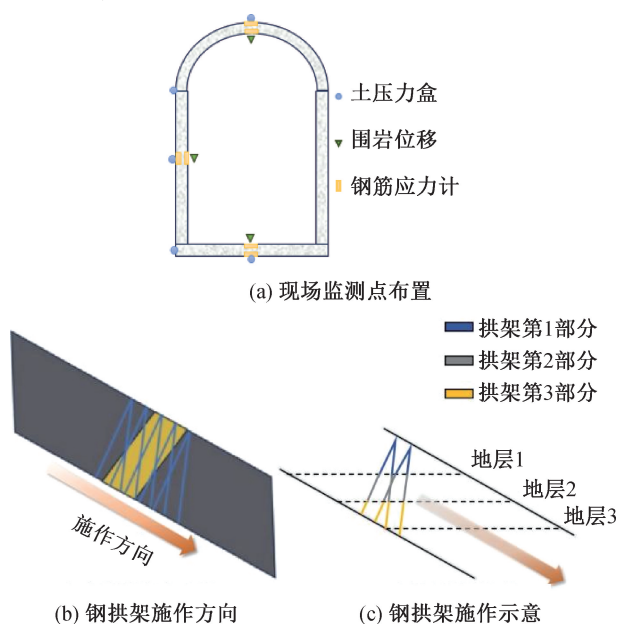


图10 现场监测点布置及钢拱架施作

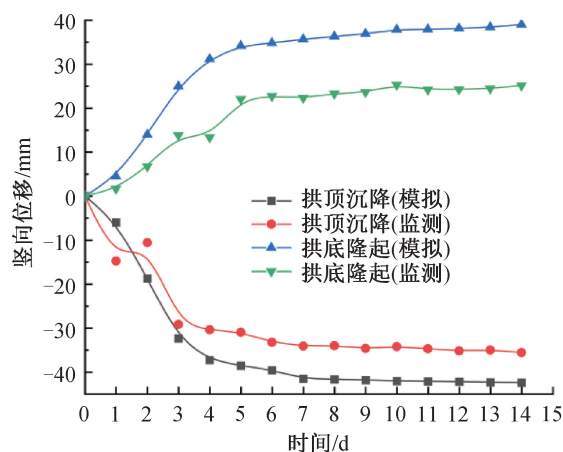
Fig. 10 Layout of on-site monitoring points and steel arch construction

#### 4.1 围岩位移监测结果分析

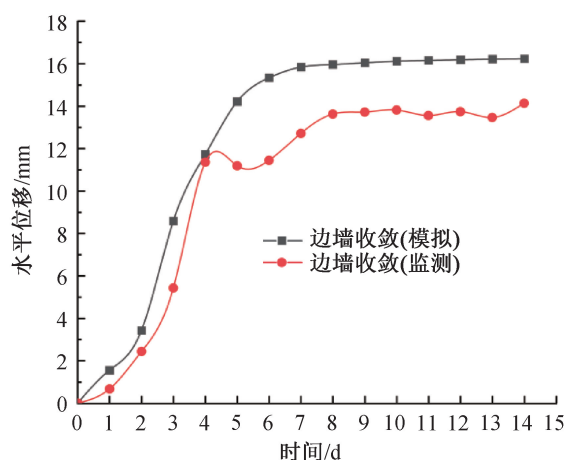
图11为断层中线处围岩位移随监测时间的变化曲线。拱顶最大沉降值、拱底最大隆起值分别为35.79、25.13 mm,比数值模拟结果减小了17.80%、36.31%。开挖后,边墙位移表现为向隧洞内收敛,最大水平位移为14.14 mm,比数值模拟结果减小了18.54%。监测与模拟结果相差较大,分析其原因,断层带力学参数难以准确获取,实验室测试或经验公式可能低估了其非线性、各向异性或流变特性;未充分模拟断层内节理、裂隙网络或软弱夹层分布,低估了岩体破碎程度;有限元方法可能未考虑开挖引起的几何非线性(如断层错动导致的局部大变形)。

#### 4.2 围岩压力监测结果分析

图12为围岩压力随监测时间的变化曲线。断层带与片麻岩地层交接段压力代表了断层带过渡到完整地层的受力情况,整体来看,断层带与片麻岩地层交接段围岩压力随监测时间的推移逐渐增



(a) 拱顶和拱底竖向位移



(b) 边墙水平位移

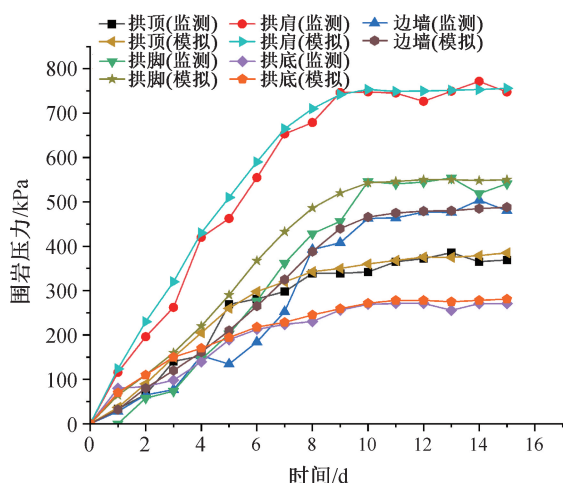
图11 断层中线处围岩位移监测结果

Fig. 11 Monitoring results of surrounding rock displacement at the center of the fault

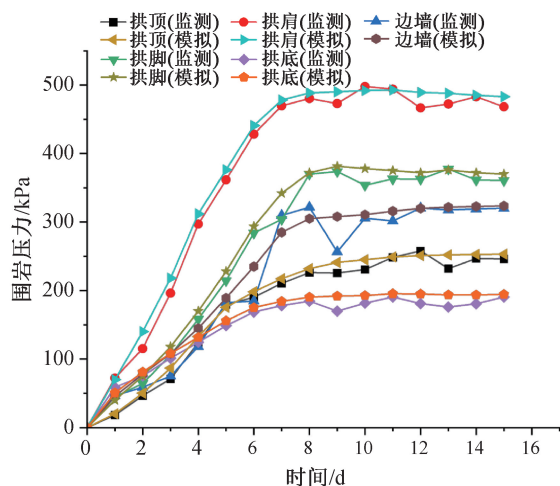
大,11 d后逐渐稳定。围岩压力从大到小依次为拱肩、拱脚、边墙、拱顶、拱底。图12(b)显示,隧洞开挖后,断层带中线处拱顶沉降和边墙收敛作用使断层处围岩压力在开挖后逐渐增大,9 d后逐渐稳定,围岩压力从大到小依次为拱肩、拱脚、边墙、拱顶、拱底。围岩压力随时间的推移趋于稳定,稳定后监测值和模拟值基本吻合。

#### 4.3 钢拱架应力监测结果分析

图13为钢拱架应力随监测时间的变化图。钢拱架内外受压,且内侧大于外侧。断层带与片麻岩地层交接段钢拱架应力在11 d后逐渐稳定。拱顶、拱肩、边墙处的钢拱架最大应力分别为169、135、72 MPa。断层带中线处钢拱架应力在8 d后逐渐稳定。拱顶、拱肩、边墙处钢拱架最大应力分别为116、145、82 MPa,均低于数值模拟结果。总体而言,钢拱架支护效果、围岩变形控制效果较好。



(a) 断层带与片麻岩地层交接段



(b) 断层带中线处

图 12 围岩压力监测结果

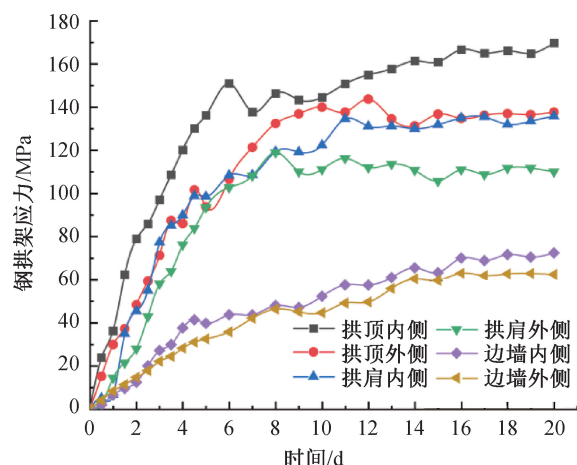
Fig. 12 Monitoring results of surrounding rock pressure

## 5 结论

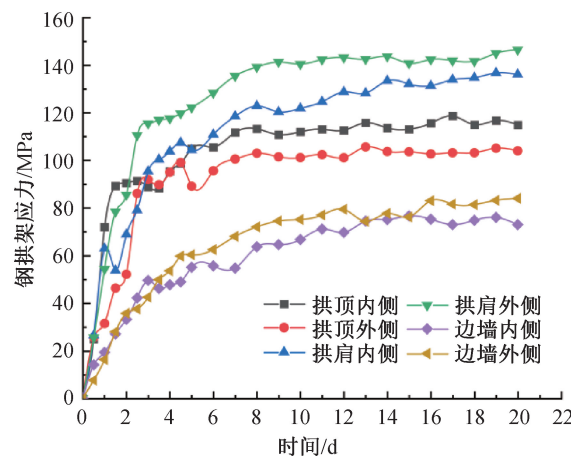
1) 本文开展了大纵坡隧洞支护方案数值模拟,发现断层处围岩竖向位移比完整地层增大了 0.8~1.5 倍,水平位移增大了 1.0~1.2 倍,需结合工程实际加强支护强度。

2) 通过有限元对比分析 4 种工况下的围岩位移、围岩压力及钢拱架应力,发现垂直于隧道轴线架立钢拱架对围岩竖向位移的控制效果更优,竖直方向架立对水平位移的控制效果更优;竖直方向架立的围岩压力控制效果优于垂直方向;增加钢拱架密度可有效降低其应力。实际工程中需合理设计钢拱架的架立方式和间距。

3) 对比最优钢拱架架立方式下的数值模拟和监测结果,拱顶最大沉降值、拱底最大隆起值分别为 35.79、25.13 mm,比数值模拟减小了 17.80%、



(a) 断层带与片麻岩地层交接段



(b) 断层带中线处

图 13 钢拱架应力监测结果

Fig. 13 Monitoring results of steel arch stress

36.31%;边墙最大水平位移为 14.14 mm,比数值模拟减小了 18.54%;钢拱架最大应力均小于数值模拟结果,隧洞衬砌结构处于安全状态。

## 参考文献:

- [1] 王万锋,赵凯,蔡元成,等. 软弱围岩地段断层形态对大断面隧道的稳定性影响分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(1):66-74.  
Wang Wanfeng,Zhao Kai,Cai Yuancheng,et al. Influence of fault thickness and dip angle on stability of large section tunnel in weak surrounding rock section [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2023,40(1):66-74.
- [2] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(3):433-445.  
Xu Qianwei,Cheng Panpan,Zhu Hehua,et al. Experimental study and numerical simulation on progressive failure characteristics of the fault-crossing tunnel surround-

- ding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 433-445.
- [3] Zhong Zilan, Wang Zhen, Zhao Mi, et al. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103527.
- [4] Wang Yaqiong, Li Jiaqi, Wang Zhifeng, et al. Structural failures and geohazards caused by mountain tunnel construction in fault zone and its treatment measures: a case study in Shaanxi [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106386.
- [5] 于丽, 吕城, 王明年. 基于非线性 M-C 准则的深埋土质隧道三维塌落破坏上限分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1023-1030.
- Yu Li, Lyu Cheng, Wang Mingnian. Three-dimensional upper bound limit analysis of deep soil tunnels based on nonlinear Mohr-Coulomb criterion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1023-1030.
- [6] 赵青云, 曹广勇, 翟朝娇. 高铁隧道断层带围岩变形规律有限元分析 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 20-23.
- Zhao Qingyun, Cao Guangyong, Zhai Chaojiao. Finite element analysis of deformation behavior of surrounding rock in high-speed railway tunnel fault zones [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2021, 39(2): 20-23.
- [7] 王天强, 崔臻, 盛谦, 等. 走滑断层作用下跨断层隧洞错断模型试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 597-605.
- Wang Tianqiang, Cui Zhen, Sheng Qian, et al. Model experimental study of the influence of strike-slip fault with dislocation on tunnel [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 597-605.
- [8] 刘国庆, 肖明, 杨阳, 等. 跨断层水工隧洞地震响应数值模拟分析方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 140-148.
- Liu Guoqing, Xiao Ming, Yang Yang, et al. Numerical simulation and analysis method of seismic response for hydraulic tunnel across fault [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 140-148.
- [9] 陈培, 马旭强, 龙杰, 等. 断层破碎带隧洞管棚支护参数设计方法 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 62-67.
- Chen Pei, Ma Xuqiang, Long Jie, et al. Method of designing pipe roof support parameters for tunnel in fault zone [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 62-67.
- [10] 赵旭, 程鼎甲, 代志杰, 等. 断层错动形式对输水隧洞的影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 96-106.
- Zhao Xu, Cheng Dingjia, Dai Zhijie, et al. Influence of fault dislocation on water conveyance tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 96-106.
- [11] 陈海亮, 高明忠, 汪文勇, 等. 跨断层隧道衬砌变形规律及损伤机理研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 38-46.
- Chen Hailiang, Gao Mingzhong, Wang Wenyong, et al. Study on the deformation law and damage mechanism of cross fault tunnel lining [J]. Advanced Engineering Science, 2018, 50(5): 38-46.
- [12] Zhang Zhiqiang, Chen Fangfang, Li Ning, et al. Influence of fault on the surrounding rock stability of a tunnel: location and thickness [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 1-11.
- [13] Kiani M, Akhlaghi T, Ghalandarzadeh A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 108-119.
- [14] Sabagh M, Ghalandarzadeh A. Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22: 100325.
- [15] 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 Fei, Tan Zhongsheng, Ma Dong. 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.
- [16] 陈晓祥, 吴俊鹏. 断层破碎带中巷道围岩大变形机理及控制技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 885-892.
- Chen Xiaoxiang, Wu Junpeng. Study on the mechanism and control technology of large deformation of roadway surrounding rock in the fault fracture zone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 885-892.
- [17] 禹海涛, 李婷婷, 陈志伟, 等. 考虑破碎带节理分布特征的隧道开挖诱发近断层错动随机性分析 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 746-754.
- Yu Haitao, Li Tingting, Chen Zhiwei, et al. Stochastic analysis of fault dislocation induced by tunnel excavation considering distribution characteristics of joints in fracture zones [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 746-754.
- [18] 汪振, 钟紫蓝, 黄景琦, 等. 走滑断层错动下山岭隧道关键断面变形及损伤演化 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S1): 425-433.

- 刷分析研究[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 15-19.
- Quan Bingxin, Zhao Jungang, Guo Xianghong, et al. Analysis and study on scour of subgrade by river bend water[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(S2): 15-19.
- [15] 谢亚光, 余明辉, 胡鹏, 等. 弯道凹岸不同部位崩塌体对近岸水流结构影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 727-737.
- Xie Yaguang, Yu Minghui, Hu Peng, et al. Experimental study on the effects of slump block at different locations upon the flow structure near the outer bank [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 727-737.
- [16] Lai Y G, Thomas R E, Ozeren Y, et al. Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model [J]. Geomorphology, 2015, 243: 116-129.
- (责任编辑 周雪梅)
- 
- (上接第 87 页)
- Zhang Shuangzhuo, Gao Guiqing, Lai Jinxing, et al. Analysis of effect of different reinforcement methods of MJS on reducing impact of pipe jacking construction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 183-191.
- [13] 张云龙. 浅埋大断面矩形顶管顶进力计算模型研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- Zhang Yunlong. Calculation model of jacking force for shallow buried rectangular box jacking [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [14] 喻军, 龚晓南. 考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- Yu Jun, Gong Xiaonan. Numerical analysis of surface settlement control considering pipe jacking construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- [15] 马险峰, 陈飞, 吴冰, 等. 顶管电缆隧道施工对邻近建筑物和地下管线的扰动影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 9074-9080.
- Ma Xianfeng, Chen Fei, Wu Bing, et al. Effect of pipe jacking cable tunnel construction on adjacent buildings and underground pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 9074-9080.
- [16] 刘群. 相似理论在装置改造上的应用[J]. 化工设计, 2004, 14(2): 46-48+2.
- Liu Qun. Application of similar theory to plant revamp [J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(2): 46-48+2.
- (责任编辑 周雪梅)

#### (上接第 97 页)

- Wang Zhen, Zhong Zilan, Huang Jingqi, et al. Deformation and damage evolution of critical cross section of mountain tunnels under strike-slip fault movement [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 425-433.
- [19] 查文华, 刘新权, 姚苏琴, 等. 露转地逆倾分步开采对含断层高陡边坡稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8403-8409.
- Zha Wenhua, Liu Xinquan, Yao Suqin, et al. Influence of step-by-step excavation from open-pit to underground with reverse tendency on stability of high and steep slopes with faults [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8403-8409.
- [20] 徐卫亚, 周家文, 邓俊晔, 等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1159-1172.
- Xu Weiya, Zhou Jiawen, Deng Junye, et al. Slope stability analysis of limit equilibrium finite element method based on the Dijkstra algorithm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1159-1172.
- [21] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.
- Li Peng, Cai Meifeng, Guo Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17.
- (责任编辑 周雪梅)