doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.2026.06.521
引用格式:张浩然,吴顺川,浦仕江,等. 基于多因素主效应分析的断层破碎带隧洞开挖方案优化研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(5):20-31.
Citation: Zhang Haoran, Wu Shunchuan, Pu Shijiang, et al. Optimization of tunnel excavation scheme in fault-fractured zone based on multi-factor main effect analysis[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2026, 51(5): 20-31.

基于多因素主效应分析的断层破碎带隧洞开挖方案优化研究

张浩然[1,2,3],吴顺川[1,2,3*],浦仕江[1,2,3],王　焘[1,2,3],向天兵[4],杨小龙[4]
(1. 昆明理工大学 国土资源与工程学院,云南 昆明 650093;
2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,云南 昆明 650093;
3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,云南 昆明 650093;
4. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司,云南 昆明 650051)

摘要: 针对滇中引水工程楚雄段伍庄村隧洞进口Ⅴ类(特)围岩区域,原开挖方案下出现掌子面附近局部塌方、拱架变形严重等问题. 结合原方案的隧洞变形监测结果,并基于该隧洞工程地质特征,通过数值模拟优选了施工开挖方法,采用正交试验结合多因素方差分析及主效应分析优化确定了施工开挖参数. 研究结果表明:伍庄村隧洞进口Ⅴ类(特)围岩区域开挖方法采用三台阶预留核心土法较为合理,确定了一台阶长度取0.50D(5 m),二台阶长度取0.30D(3 m),二台阶高度取0.30D(3 m),核心土长度取0.50D(5 m),核心土宽度取0.60D(6 m),核心土高度取0.25D(2.5 m)的隧洞跨度比例作为施工开挖参数较为适用. 该方案能有效控制拱顶和拱腰处围岩位移的发展,减少变形并提高施工稳定性. 优化后的施工开挖方法及参数在现场应用后,隧洞围岩变形量明显减少,且最终趋于稳定. 该研究为类似工程地质条件下隧洞的开挖方法选择及施工参数优化提供了参考依据.

关键词: 引水隧洞;软弱围岩;施工开挖方法;参数优化;正交试验;主效应分析
中图分类号:TV554　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-855X(2026)05-0020-12

Optimization of tunnel excavation scheme in fault-fractured zone based on multi-factor main effect analysis

Zhang Haoran[1,2,3], Wu Shunchuan[1,2,3*], Pu Shijiang[1,2,3], Wang Tao[1,2,3], Xiang Tianbing[4], Yang Xiaolong[4]
(1. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650093, China;
4. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China)

收稿日期:2024-12-19. **基金项目**:国家自然科学基金项目(52469014);云南省自然科学基金项目(202201AU070130,202202AG050014).
作者简介:张浩然(2001-),男,硕士研究生. 主要研究方向:岩石力学,地下工程. **E-mail**:1161121063@qq.com
通信作者:吴顺川(1969-),男,博士,教授,博士生导师. 主要研究方向:采矿工程、岩土工程、工程灾害防控.
E-mail:wushunchuan@kust.edu.cn

Abstract: In the Chuxiong section of the Central Yunnan Water Diversion Project, issues such as localized collapse near the tunnel face and severe arch frame deformation occurred in the Class V (special) surrounding rock area at the entrance of the Wuzhuang Village Tunnel under the original excavation scheme. By integrating the tunnel deformation monitoring results of the original scheme and based on the engineering geological characteristics of the tunnel, numerical simulation was used to optimize the construction excavation method. Additionally, an orthogonal test combined with multi – factor variance analysis and main effect analysis was adopted to optimize and determine the construction excavation parameters. The results show that the three – bench excavation method with reserved core soil is more reasonable for the Class V (special) surrounding rock area at the entrance of the Wuzhuang Village Tunnel. The suitable construction excavation parameters are determined as follows: first bench length 0.50D (5 m), second bench length 0.30D (3 m), second bench height 0.30D (3 m), core soil length 0.50D (5 m), core soil width surrounding rock area at the entrance of the Wuzhuang Village Tunnel. The suitable construction excavation parameters are determined as follows: first bench length 0.50D (5 m), second bench length 0.30D (3 m), second bench height 0.30D (3 m), core soil length 0.50D (5 m), core soil width 0.60D (6 m), and core soil height 0.25D (2.5 m), which are based on the tunnel span ratio. This scheme can effectively control the development of surrounding rock displacement at the crown and haunch, reduce deformation, and improve construction stability. After the optimized excavation method and parameters were applied on site, the deformation of the tunnel surrounding rock was significantly reduced and eventually stabilized. This study provides a reference for the selection of excavation methods and optimization of construction parameters in tunnels under similar engineering geological conditions.

Keywords: water diversion tunnel; soft surrounding rock; construction excavation method; parameter optimization; orthogonal test; main effect analysis

0 引 言

滇中引水工程是有效缓解滇中地区水资源短缺、保障云南经济社会可持续发展的大型工程[1]. 该工程隧洞段长度占线路总长的 92.13%,楚雄段沿线红层软岩分布最为广泛,穿越滇中红层的隧道段长度达 125.95 km,占该段隧道总长度的 88%[2]. 此类软岩结构稳定性差,施工过程中极易发生大变形或坍塌,在大断面隧洞工程中尤为突出,因此选择合理的施工方法及施工参数可有效降低风险.

针对大断面软弱破碎围岩隧洞的施工方法及参数优化问题,众多专家学者进行了广泛研究. Mostafa 等[3]从 CD(Center Diaphragm)法和 SD(Single Diaphragm)法中选择合适的施工方法,并对不同的开挖顺序及台阶长度进行数值模拟分析得出最佳开挖顺序及最佳开挖距离;Zhu 等[4]对 HB(Heading and Benching)法和 CD 法在大断面隧道开挖时的台阶高度进行参数优化,得到各工法下最优台阶高度;Duan 等[5]总结了不同围岩等级条件下双向六车道大跨度隧道合理的开挖方法;Li 等[6]通过一系列现场试验和数值模拟,揭示了三台阶七步法施工黄土隧道的位移特征,得到了最佳施工方案;林可夫等[7]结合正交试验对三台阶法施工参数进行优化设计得出了Ⅳ类围岩地段施工参数选取;张学富等[8]对双侧壁导坑和单侧壁导坑结合等 4 种施工方法进行数值模拟分析,得到最优的组合施工方法;丁建隆[9]在双侧壁导坑加拱部跳挖法的基础上,设置不同的施工顺序得到三种不同工法,结合有限元模拟,得出最优施工工法;王伟锋等[10]对 4 种施工工法(全断面法、短台阶法、单侧壁导坑法和双侧壁导坑法)进行模拟,认为双侧壁导坑法施工引起的位移和塑性区大小均优于其他工法;黄小明等[11]对扁平特大断面隧道下三台阶法与 CD 法进行非线性对比研究,得出 CD 法比三台阶法塑性区更小,围岩稳定性更好的结论;李卓霖等[12]选取全断面法、二台阶法、三台阶法及预留核心土法进行对比分析,选取了最适宜的施工方法,并对开挖进尺开展了参数优化;黄锋等[13]对不同开挖循环进尺条件下的全断面法进行数值模拟分析,得出不同进尺施工时围岩变化规律;周艺等[14]探究了 7 种工法下破碎千枚岩隧道开挖变形及支护力学响应特征.

综上所述,目前国内外对于软岩隧洞开挖方法及参数优化的研究较多,但大部分研究仅仅针对开挖方法或参数因素进行单方面分析,对于优化分析手段的研究较为单一. 本文综合运用了正交试验、方差分析、

主效应分析、数值模拟等方法,对软弱围岩大断面隧洞开挖方法进行优选,进而对开挖方法的台阶长度、台阶高度、核心土尺寸进行组合分析,根据隧洞施工导致的围岩变形位移特征,选择最优施工开挖参数,为隧洞施工提供更加安全且经济的开挖方式.

1 工程概况

滇中引水工程是经中华人民共和国国务院批准、国家发展改革委和水利部确定的 172 项重大节水供水工程中的标志性工程之首[15]. 工程建成后能有效缓解滇中地区水资源短缺问题,是保障云南经济社会可持续发展的重要基石. 伍庄村隧洞位于滇中引水工程楚雄段,隧洞全长约 11.42 km,隧洞开挖设计尺寸根据围岩分级的不同,采用了不同的设计方案. 本文所选洞段设计宽度为 10 m、高度为 10.72 m,隧洞断面如图 1 所示.

1.1 工程地质条件

根据地质调查结果,伍庄村隧洞进口段桩号 CX41 +760 ~ CX41 +820 埋深 70 ~90 m,围岩应力主要为垂直应力,围岩地质情况较差,以断层破碎带为主;断层破碎带岩性多为 Q^{al+pl}(冲、洪积层):砂卵砾石、粉细砂,粉土、粉质黏土混漂石. 该段构造程度复杂,断层顶拱岩体遇水有软化现象,岩体极不稳定,并伴随渗水等穹窿现象,围岩质量极差,为极不稳定的 V(特)类围岩.

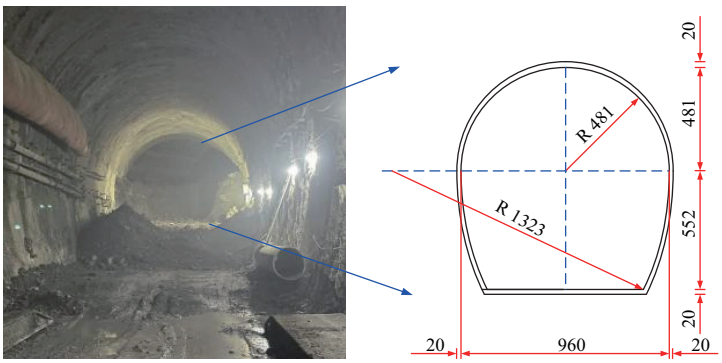


图 1 隧洞截面图

Fig. 1 Tunnel cross – sectional view

1.2 伍庄村隧洞进口段施工开挖方案

伍庄村隧洞进口原采用二台阶长台阶法爆破开挖,支护方案采用系统锚杆 + 钢拱架 + 混凝土 + 二衬. 二次衬砌后断层破碎带区域隧洞围岩变形速率始终维持在较高水平,拱顶沉降的最大变形速率为 29.24 mm/d,B – C 净空变化和 D – E 净空变化的最大变形速率分别达到 31.40 mm/d 和 37.48 mm/d,大幅超出施工安全控制阈值;并且在后续施工过程中也出现多次支护结构失效等问题,如图 2 所示. 因此,掌子面初支不稳定、变化速率较快、随挖随落等现象表明当前开挖方案在安全性方面存在较大问题,亟须针对该地质条件下的施工开挖方案开展深入研究,以指导工程实践,有效控制围岩大变形,从而保障工程质量和施工安全.



(a)伍庄村隧洞进口换拱施工 (b)伍庄村隧洞进口掌子面塌方

图 2 隧洞塌方及大面积换拱

Fig. 2 Tunnel collapse and large area arch replacement

2 开挖施工方法及数值分析

2.1 数值模型建立

本文通过 FLAC3D 建立数值分析模型,如图 3(a)所示. 模型尺寸为 100 m × 30 m × 80 m(长 × 宽 ×

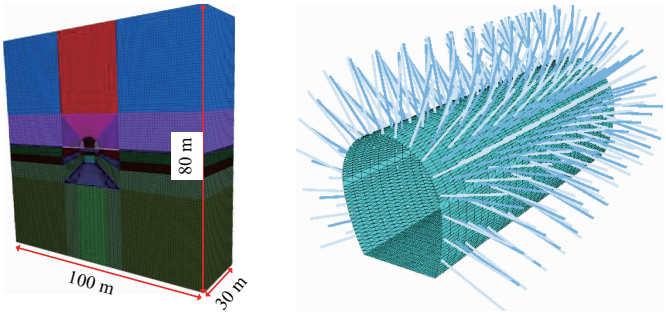
高），计算模型施加的边界条件为：计算模型上部边界为自由边界；前、后、左、右边界水平位移固定；模型底部边界全位移固定. 在数值计算中，工程埋深均值为 80 m，模型顶面边界施加 40 m 相应的垂直应力，并通过 FLAC3D 的自重应力平衡功能实现模型的初始应力场平衡，赋予计算模型 Mohr – Coulomb 准则模拟其力学响应，围岩采用实体单元，锚杆采用 Cable 单元，喷射混凝土采用 Shell 单元. 隧洞初期支护网格如图 3(b)所示. 围岩物理力学参数如表 1 所示.

对于软弱围岩隧洞，因变形速率大，持续时间长，保证初期支护的稳定性是隧洞施工的关键[16]. 因此对数值模拟中的围岩变形的分析只考虑初期支护期间的变化，不施加二次衬砌的模型及物理参数.

在隧洞初期支护中存在钢拱架支撑，在计算模型中通过折算系数将钢拱架支撑系数折算到喷射混凝土的 shell 模型里，等效折算公式[17]如下：

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \tag{1}$$

式中：E 为折算后混凝土的弹性模量，MPa；E_0 为原喷射混凝土的弹性模量，MPa；E_g 为钢材的弹性模量，MPa；S_g 为钢拱架的截面积，m^2；S_c 为喷射混凝土的截面积，m^2.



(a)隧洞网格　　(b)初支网格

图 3　数值计算模型

Fig. 3　Numerical calculation model

表 1　围岩物理力学参数

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of surrounding rock

弹性模量 E/GPa	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c/MPa	泊松比 μ	重度/(kN · m^{-3})
0.5	22	0.16	0.35	24

2.2　隧洞开挖方法设计

根据国内外隧洞工程开挖经验，适用于软弱围岩隧洞开挖方法有全断面法、台阶法以及分部开挖方法(如 CD 法、CRD 法、单侧壁导坑法及双侧壁导坑法等)[18]. 根据新奥法施工原理，软弱围岩隧洞通常采用多分部、小断面开挖的基本原则. 因此，在国内软岩隧洞(尤其是大跨度隧洞)施工中，多分部方法被广泛应用[19].

然而，已有研究[20]表明多分部施工方法从隧洞围岩变形控制上来讲容易引起大变形，在Ⅴ类(特)破碎围岩隧洞的施工中，应从软弱围岩“少分步、快速施工技术”出发. 对于本隧洞这类大跨度、大断面工程，多分部开挖会延长支护闭合时间，增加支护距离，从而加剧围岩扰动. 此外，对于多分部开挖来说，开挖面小机械施工作业不方便，施工进度慢[21]. 具体优缺点如表 2 所示.

表 2　各个施工方法优缺点

Tab. 2　The advantages and disadvantages of each construction method

施工方法	优点	缺点	适用条件
全断面法	全断面一次成型，对围岩开挖扰动次数少，对隧道的围岩稳定有利.	由于开挖面较大，围岩稳定性降低.	适用于Ⅱ ~ Ⅴ级围岩，开挖断面较小时.
台阶法	施工过程中灵活多变，适用性强；具台阶开挖有利于掌子面的稳定.	上下台阶作业时会互相干扰.	Ⅳ ~ Ⅴ级围岩开挖断面较大时.
多分部开挖方法	能有效控制围岩变形，作业安全性高.	工序繁琐、施工及支护速度慢、成本高、作业空间小.	Ⅴ级围岩开挖断面较大，附近有重要建筑物，如城市地铁.

结合隧洞实际地质情况，遵循“弱爆破、短进料、少扰动、早喷锚、勤测量”的原则，从软弱围岩“少分步、快速施工技术、快速闭合”出发，本文选择二(微)台阶法、三台阶法及三台阶预留核心土法进行开挖方法初选，随后，对所选开挖方法的施工开挖参数进行优化设计，最终确定适用于该隧洞的最优施工开挖方案，具体路线如图 4 所示.

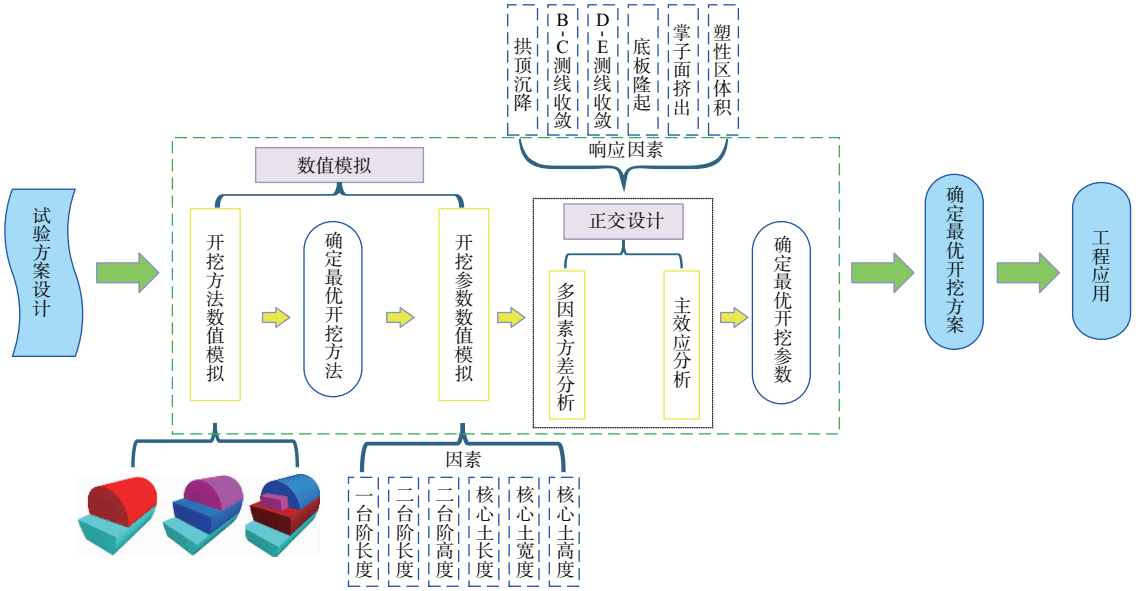


图 4 技术路线图

Fig. 4 Technical roadmap

2.3 隧洞施工开挖方法比选

隧洞施工是一项复杂的系统工程,选取的开挖方法应以控制围岩变形为核心,本节重点围绕拱顶沉降、B－C 及 D－E 测线水平收敛,以及掌子面稳定性展开研究,对施工方法进行了初步筛选,隧洞测点和测线布置如图 5 所示,施工方法对比及所选施工参数如表 3 所示.

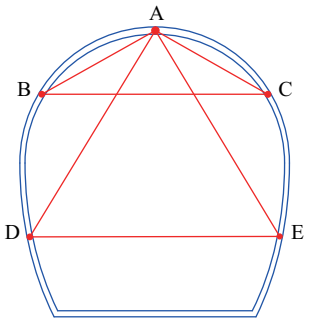


图 5 隧洞测点、侧线布置图

Fig. 5 Tunnel measuring point and side line layout diagram

2.3.1 隧洞围岩最大主应力分析

3 种工法下的围岩应力分布如图 6 所示.

由图 6 可见,无论何种开挖方法,隧洞拱顶所受围岩应力最大,拱腰及拱底应力最小. 开挖方法转变时三台阶法与二台阶法拱顶应力基本在 1.1 MPa,其他部位也基本相近,变化不显著. 而三台阶预留核心土法与二台阶法和三台阶法相比,隧洞各部位应力都分别降低了 15.3% ~21.5% 、12.3% ~19.6%. 总体来说,二台阶法和三台阶法因开挖过程中裸露围岩面积较大,易导致洞周围岩应力集中,从而增加施工风险.

2.3.2 隧洞围岩变形分析

3 种施工开挖方法的最终位移如图 7 所示.

表 3 各个开挖方法施工参数

Tab. 3 Construction parameters for each excavation method m

施工方法	开挖进尺	台阶长度	一台阶高度	二台阶高度
二(微)台阶法	0.5	3	4.5	6.52
三台阶法	0.5	3	4.5	4
三台阶预留核心土法	0.5	3	4.5	4

由图 7 可知,3 种施工方法在隧洞开挖时,目标断面下二(微)台阶法拱顶沉降量为 91.40 mm,B－C 测线水平收敛 80.00 mm,D－E 测线水平收敛 73.20 mm;三台阶法施工拱顶沉降为 51.88 mm,B－C 测线水平收敛 54.39 mm,D－E 测线水平收敛 50.92 mm;三台阶预留核心土法拱顶沉降为 36.27 mm,B－C 测线水平收敛 25.04 mm,D－E 测线水平收敛 40.36 mm. 以三台阶预留核心土法为基准,三台阶法及二台阶法开挖引起的拱顶沉降依次增加了 43% 和 152% ,B－C 测线水平收敛分别增加了 117% 和 219% ,D－E 测线水平收敛分别增加了 26% 和 81%.

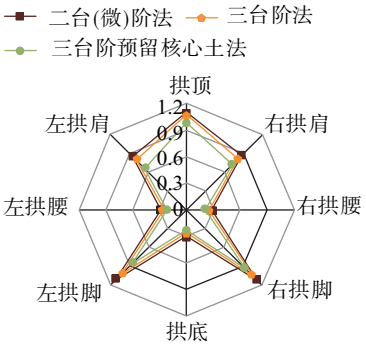


图 6　3 种工法下围岩应力分布/MPa

Fig. 6　Stress distribution of surrounding rock under three excavation methods/MPa

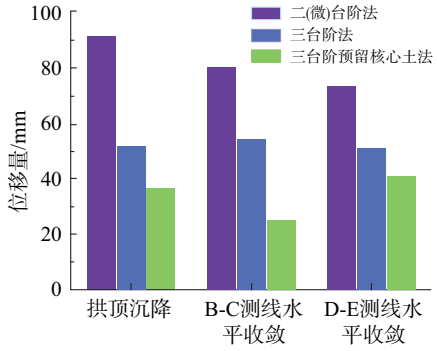
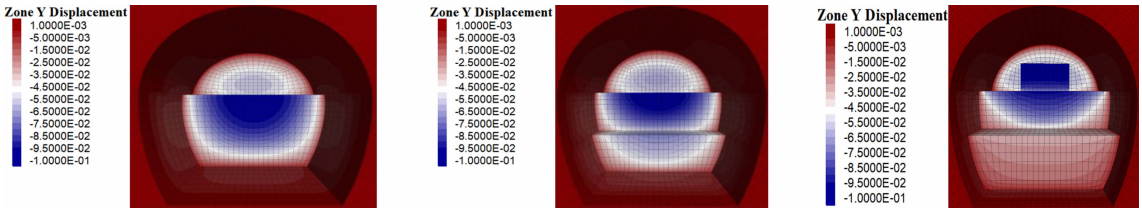


图 7　各开挖方法下位移结果图

Fig. 7　Displacement result diagram under each excavation method

2.3.3　掌子面位移分析

提取数值模拟中采用 3 种开挖方法在开挖过程中的掌子面位移云图，如图 8 所示. 二台阶法在开挖过程中，掌子面围岩扰动圈范围最大，这可能是由于一次性开挖面积较大，导致围岩的扰动范围显著扩大，进而增加了掌子面失稳的风险. 三台阶法虽通过进一步细分开挖区域，在掌子面稳定性上起到一定控制作用，但控制效果仍显不足，依旧存在施工风险.



(a)二(微)台阶法　　(b)三台阶法　　(c)三台阶预留核心土法

图 8　掌子面位移云图

Fig. 8　Tunnel surface displacement contour

相比之下，三台阶预留核心土法在掌子面中部形成了稳定支撑，有助于平衡周围岩体的侧向应力，优化岩体应力分布，减少应力集中效应，从而增强掌子面的自稳能力. 三台阶预留核心土法在掌子面沿开挖面最大位移控制方面展现了其优越性.

综上所述，二(微)台阶法和三台阶法均不利于施工安全. 因此，该隧洞初步选择采用三台阶预留核心土法进行隧洞开挖.

3　施工开挖参数优化

正交试验设计方法通过合理选择因素和水平的组合，利用正交表有效减少试验次数，以较少的实验数据全面评估各因素对因变量的影响，从而为优化过程提供科学依据. 本文借助统计分析软件 SPSS 设计 $L_{25}(4^6)$ 正交表，旨在探讨多种施工参数对隧洞围岩变形的影响，以期为隧洞施工过程中的围岩稳定性提供科学依据.

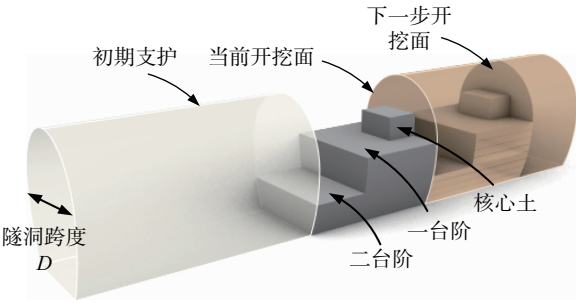


图 9　三台阶核心土法开挖示意图

Fig. 9　Excavation schematic diagram of the three – step method with reserved core soil

3.1　三台阶预留核心土法参数正交设计

结合伍庄村隧洞进口段地质条件，分别对三台阶预留核心土法的一台阶长度、二台阶长度、二台阶高度及预留核心土的长、宽、高进行施工开挖参数正交设计优化，如图 9 所示. 其中上台阶高度固定为 4.5 m，下台阶高度 = 隧洞开挖高度 -(一台阶高度 + 二台阶高度)，各施工开挖参数的水平表达形式为参

数取值与隧洞跨度(D)的比值. 三台阶预留核心土法施工开挖参数正交表,如表4~表5所示.

3.2 数值模拟正交试验结果

按4.1节所给出的正交试验设计,开展数值模拟试验. 其中,运用FLAC内置FISH语言提取实验结果中的塑性区体积,计算得出塑性区体积占整体模型体积之比,以确保计算结果的准确性和可比性. 试验结果如表6所示. 由表6可知:工况12下拱顶沉降、B-C测线收敛最小,分别为19.73 mm、15.65 mm;工况10下D-E测线收敛最小,为40.10 mm;工况2的塑性区体积比最小,为0.0160 8;工况1底板隆起最小,为25.21 mm;工况9下掌子面挤出位移最小,为23.24 mm.

表4 施工开挖参数正交试验设计

Tab. 4 Orthogonal experimental design for excavation parameters

水平	一台阶长度/D	二台阶长度/D	二台阶高度/D	核心土宽度/D	核心土长度/D	核心土高度/D
水平1	0.50	0.30	0.30	0.30	0.20	0.15
水平2	0.60	0.40	0.35	0.40	0.30	0.18
水平3	0.70	0.50	0.40	0.50	0.40	0.22
水平4	0.80	0.60	0.45	0.60	0.50	0.25

注:D为隧道跨度;表中各参数均以洞径D的倍数表示,为无量纲,下同.

表5 六因素四水平正交试验表

Tab. 5 Orthogonal experimental table for six factors and four levels

工况	一台阶长度/D	二台阶长度/D	二台阶高度/D	核心土宽度/D	核心土长度/D	核心土高度/D
S1	0.80	0.60	0.35	0.30	0.40	0.25
S2	0.70	0.50	0.30	0.30	0.50	0.22
S3	0.50	0.50	0.40	0.60	0.40	0.15
S4	0.70	0.30	0.45	0.60	0.20	0.25
S5	0.50	0.30	0.30	0.30	0.20	0.15
S6	0.50	0.5	0.35	0.50	0.20	0.15
S7	0.50	0.30	0.45	0.30	0.30	0.1.5
S8	0.60	0.50	0.30	0.40	0.30	0.25
S9	0.80	0.40	0.30	0.60	0.50	0.15
S10	0.60	0.30	0.30	0.30	0.40	0.15
S11	0.70	0.60	0.40	0.40	0.20	0.15
S12	0.80	0.30	0.30	0.40	0.20	0.15
S13	0.50	0.40	0.30	0.50	0.20	0.25
S14	0.50	0.60	0.30	0.60	0.30	0.18
S15	0.70	0.40	0.35	0.30	0.30	0.15
S16	0.60	0.30	0.35	0.60	0.20	0.22
S17	0.60	0.60	0.45	0.50	0.50	0.15
S18	0.70	0.30	0.30	0.50	0.40	0.18
S19	0.50	0.30	0.35	0.40	0.50	0.18
S20	0.80	0.50	0.45	0.30	0.20	0.18
S21	0.50	0.30	0.40	0.30	0.50	0.25
S22	0.50	0.60	0.30	0.30	0.20	0.22
S23	0.50	0.40	0.45	0.40	0.40	0.22
S24	0.80	0.30	0.40	0.50	0.30	0.22
S25	0.60	0.40	0.40	0.30	0.20	0.18

表6 数值模拟正交试验结果

Tab. 6 Numerical simulation results of orthogonal experiment

工况	拱顶沉降/mm	B-C测线收敛/mm	D-E测线收敛/mm	底板隆起/mm	掌子面挤出位移/mm	塑性区体积比
S1	20.23	16.91	42.42	25.21	32.32	0.056 91
S2	21.73	17.28	52.27	29.83	27.73	0.016 08
S3	20.23	15.67	47.92	29.58	32.81	0.050 30
S4	22.61	18.84	43.60	29.77	31.63	0.052 31
S5	21.98	17.89	52.31	32.08	32.91	0.044 43
S6	21.36	16.10	54.01	29.40	28.07	0.050 26
S7	20.97	16.52	50.13	29.09	27.43	0.062 52
S8	22.50	18.18	43.33	30.69	27.35	0.050 69
S9	21.89	16.77	54.16	29.74	23.24	0.052 31
S10	20.48	15.87	40.10	29.05	27.48	0.046 68
S11	22.46	18.81	43.52	29.52	30.52	0.056 41
S12	19.73	15.65	43.84	28.65	25.98	0.051 38
S13	20.83	17.21	43.27	28.72	29.32	0.048 68
S14	20.76	16.53	48.45	28.84	28.66	0.049 78
S15	23.77	18.87	62.60	30.59	29.61	0.085 15
S16	24.42	23.29	54.67	29.01	29.80	0.048 51
S17	21.98	18.35	48.12	29.37	27.13	0.056 06
S18	24.23	21.53	58.42	30.97	27.71	0.048 57
S19	21.62	18.68	44.32	28.82	28.77	0.049 40
S20	25.21	23.32	58.54	29.92	29.13	0.059 14
S21	22.77	20.70	45.84	29.48	29.27	0.046 81
S22	22.68	21.46	50.96	29.15	25.76	0.050 27
S23	23.36	22.00	52.76	29.50	22.24	0.049 75
S24	26.41	27.82	62.07	33.63	26.24	0.053 02
S25	26.62	20.85	65.56	36.26	30.22	0.050 40

3.3 隧洞围岩位移影响因素分析

根据表 5 所设置正交试验方案,得到拱顶沉降、B－C 测线收敛、D－E 测线收敛、拱底变形、掌子面挤出位移、塑性区体积比的方差分析如表 7 所示,其中 a、b、c、d、e、f 分别代表一台阶长度、二台阶长度、二台阶高度、核心土长度、核心土宽度、核心土高度.

表 7　响应因素位移方差分析

Tab. 7　Analysis of variance of response factor displacement

因素	自由度	拱顶沉降		B－C 测线收敛		D－E 测线收敛		拱底变形		掌子面挤出		塑性区体积比	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
a	3	15.28	0.003	14.53	0.004	4.26	0.062	4.10	0.067	7.44	0.019	0.25	0.856
b	3	8.36	0.015	1.92	0.228	9.03	0.012	8.52	0.014	14.14	0.004	1.48	0.311
c	3	1.56	0.294	0.25	0.858	2.36	0.170	1.74	0.258	1.95	0.223	2.33	0.173
d	3	1.41	0.330	1.19	0.389	1.72	0.262	0.97	0.467	2.92	0.123	0.02	0.996
e	3	3.18	0.106	2.01	0.215	0.72	0.575	0.91	0.490	31.12	0.000	2.45	0.162
f	3	0.28	0.838	0.78	0.546	1.49	0.308	1.71	0.264	4.38	0.059	1.79	0.249

表 7 方差分析中:F 值用于衡量变量间差异的显著性,F 值越大,变量之间的差异越明显. P 值表示统计量(F 值)出现的概率,概率越低,则表示差异越显著,一般情况下将 P 值与显著性水平 α 进行比较以评估差异的显著性. 本文中设置显著性水平 $\alpha=0.05$,指错判其显著性的风险为 5%,即人为因素有 95% 的概率对因变量影响显著. F 值和 P 值通常一起使用来判断实验结果的显著性.

由表 6 可知:拱顶沉降的显著性排序为 $F_a>F_b>F_e>F_c>F_d>F_f$,其中 $P_a<P_b<0.05$,故可以认为一台阶长度及二台阶长度对拱顶沉降影响显著;B－C 测线收敛的显著性排序为 $F_a>F_e>F_b>F_d>F_f>F_c$,其中仅有 $P_a<0.05$,可以得出一台阶长度对 B－C 测线收敛影响显著;D－E 测线收敛的显著性排序为 $F_b>F_a>F_c>F_d>F_f>F_e$,其中仅有 $P_b<0.05$,可以得出二台阶长度对 D－E 测线收敛影响显著;拱底变形的显著性排序为 $F_b>F_a>F_c>F_f>F_d>F_e$,其中仅有 $P_b<0.05$,可以得出二台阶长度对拱底变形影响显著;掌子面挤出位移的显著性排序为 $F_e>F_b>F_a>F_f>F_d>F_c$,其中有 $P_e<P_b<P_a<0.05$,可以得出核心土宽度、二台阶长度、一台阶长度均对掌子面挤出位移影响显著核心土宽度影响最大;塑性区体积比的显著性排序为 $F_e>F_c>F_f>F_b>F_a>F_d$,但各因素均对塑性区体积比无显著性影响.

3.4 施工开挖参数主效应分析

主效应分析主要展示多个自变量对因变量的独立影响,反映自变量水平变化时因变量的变化趋势及各水平之间的差异. 根据 3.3 节方差分析,绘制各因素的主效应图如图 10 ~ 图 15 所示.

如图 10 所示,一台阶长度及二台阶长度主效应均表现为随着长度的增加,拱顶沉降位移呈显著增大,存在正相关关系,两条线大致平行,这表明两因素之间不存在显著的交互作用. 其余非显著因素则呈现出倒“U”型、正“U”型、折叠型变化关系,最佳水平大致出现在中等范围取值.

如图 11 所示,一台阶长度主效应表现为随着台阶长度的增加,B－C 测线收敛位移呈阶梯形增大(由优变劣),斜率先增后减,存在正相关关系. 其余非显著因素则呈现出倒“U”型、正“U”型或缓慢阶梯形增加的趋势变化.

如图 12 所示,二台阶长度主效应表现为台阶长度越长,D－E 测线收敛位移呈现递增趋势,涨幅递减,存在正相关关系. 其余非显著因素变化态势呈“增－减－增”“减－增－减”的非单调变化趋势.

如图 13 所示为塑性区体积比主效应图,由于各因素对该因变量不存在主效应,故对塑性区体积比进行直观分析,其中核心土长度的取值对塑性区体积比的扰动最大,故取核心土长度这一因素为其显著性因素.

如图 14 所示,二台阶长度主效应表现为台阶长度越长,拱底变形位移呈现出指数增长趋势,存在正相关关系. 非显著因素中一台阶长度呈“J”型变化趋势,一台阶长度水平较小时呈现缓慢下降趋势,拱底变

形达到最小后,随着水平的增加,开始迅速上升,其余因素变化态势呈“增 - 减 - 增”“减 - 增 - 减”的非单调变化趋势.

如图 15 所示,一台阶长度、二台阶长度、核心土宽度均有主效应,分别表现为一台阶长度越长,掌子面挤出位移呈指数型减小趋势,存在负相关关系;二台阶长度呈现为“V”型变化态势,在长度为 5 m 时到达谷底,随后曲线迅速增加,并超出初始水平;核心土宽度呈“减 - 增 - 减”变化形式,整体呈减小趋势,在最大水平到达最低点. 其余非显著因素变化态势呈“增 - 减 - 增”“减 - 增 - 减”的非单调变化趋势.

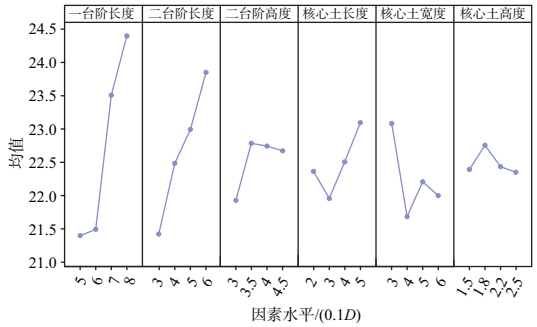


图 10 拱顶沉降主效应图

Fig. 10 Main effect plot of vault Settlement convergence

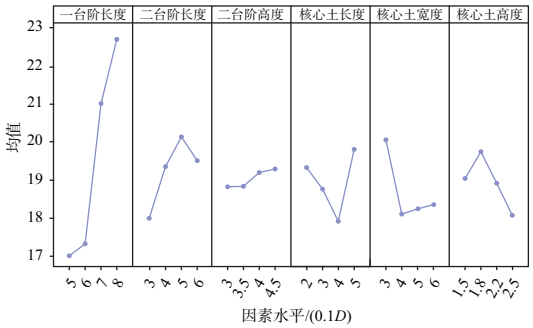


图 11 B – C 测线收敛主效应图

Fig. 11 Main effect plot of convergence along the B – C survey line

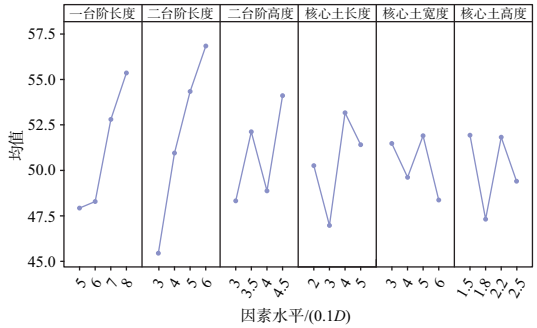


图 12 D – E 测线收敛主效应图

Fig. 12 Main effect plot of convergence along the D – E survey line

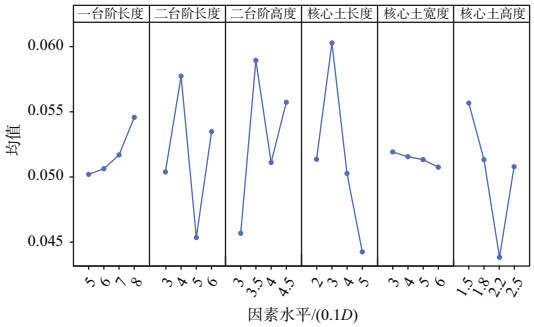


图 13 塑性区体积比主效应图

Fig. 13 Main effect diagram of plastic zone volume ratio

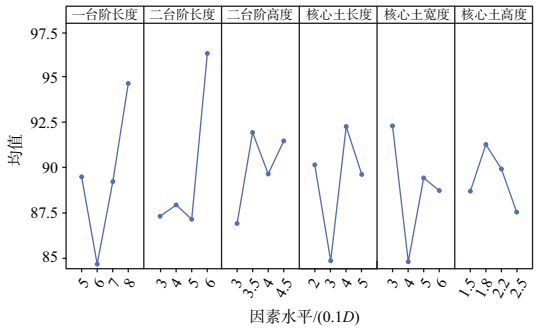


图 14 拱底变形主效应图

Fig. 14 Main effect plot of vault bottom deformation

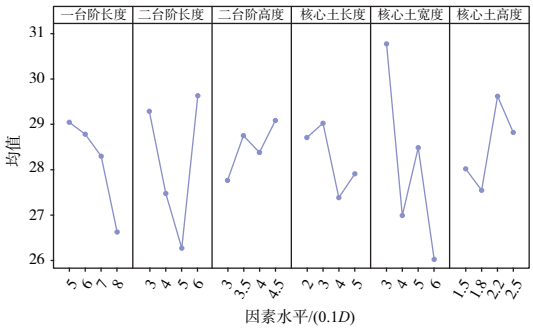


图 15 掌子面挤出位移主效应图

Fig. 15 Main effect plot of face extrusion displacement

3.5 最优施工开挖参数

综合上述分析,可得出各响应因素最优施工开挖参数,具体如表 8 所示. 其中一台阶长度对于拱顶沉

降、B－C 测线收敛、掌子面挤出等影响显著,一台阶长度由 0.50D 转变为 0.80D 时,各响应因素差值分别为:2.97、5.57、－2.35 mm,分别增加或减小了 13.88%、32.76%、8.1%,应分配 B－C 测线收敛更高权重,故选取一台阶长度为 0.50D(5 m). 二台阶长度对于拱顶沉降、D－E 测线收敛、拱底变形、掌子面挤出影响显著,当开挖参数转变时,各个响应因素分别增加或减少了 11.20%、24.04%、11.53%、10.81%,因此应首先考虑 D－E 测线收敛的最优二台阶长度,即 0.30D(3 m). 核心土长度对塑性区体积比影响较为显著,故所选核心土长度为塑性区体积比的最优参数 0.50D(5 m). 核心土宽度仅对掌子面挤出位移影响显著,故所选核心土宽度为掌子面挤出位移的最优参数 0.60D(6 m). 剩余施工参数对于响应因素均无显著性影响,可选出二台阶高度 =0.30D(3 m)、核心土高度 =0.25D(2.5 m).

表 8　各响应因素对应的最优施工开挖参数

Tab. 8　Optimal construction parameters corresponding to each response factor

响应因素	一台阶长度/D	二台阶长度/D	二台阶高度/D	核心土长度/D	核心土宽度/D	核心土高度/D
拱顶沉降	0.50*	0.30*	0.30	0.30	0.40	0.25
B－C 测线收敛	0.50*	0.30	0.30	0.40	0.40	0.25
D－E 测线收敛	0.50	0.30*	0.30	0.30	0.60	0.18
拱底变形	0.60	0.30*	0.30	0.30	0.40	0.15
掌子面挤出	0.80*	0.50*	0.30	0.40	0.60*	001 8
塑性区体积比	0.50	0.50	0.30	0.50*	0.60	0.22

注:* 为各响应因素的显著性影响因素.

综上,为使各响应因素综合变形量最小,一台阶长度可取 0.50D(5 m),二台阶长度取 0.30D(3 m),二台阶高度取 0.30D(3 m),核心土长度取 0.50D(5 m),核心土宽度取 0.60D(6 m),核心土高度取 0.25D(2.5 m).

4　现场应用与监测结果分析

上文研究结果表明,在伍庄村隧洞进口段桩号 CX41＋760～CX41＋820 范围内更换施工方法采用三台阶预留核心土法,一台阶长度 5 m、二台阶长度 3 m、二台阶高度 3 m、核心土长度 5 m、核心土宽度 6 m、核心土高度 2.5 m 的施工参数进行现场施工.

现场监测设备采用全站仪,其中测点布置如图 5 所示. 监测频率为开挖结束后的第一周一天两测,之后半个月内一天一测,之后一周测量一次,直至数据收敛达到平衡. 选取桩号内三个断面现场监测结果如图 16 所示.

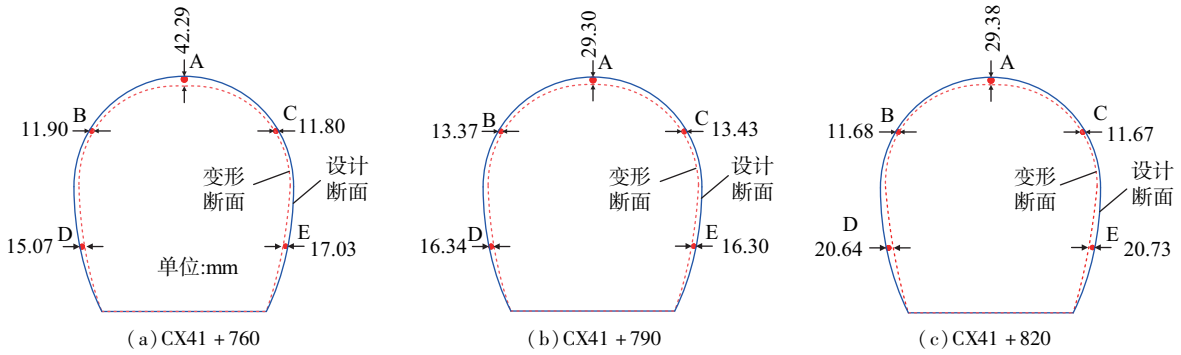


图 16　断面实际监测位移值

Fig. 16　Actual measured displacement values of the cross－section

由图16可知,所选施工方案对比原开挖方案能有效控制隧洞围岩变形,变形量减小且最终趋于稳定状态.研究结果验证了“少分步、快速施工技术、快速闭合”施工理念在断层破碎带隧洞变形控制中的有效性.该方案在技术可行性方面表现良好,能够有效控制围岩变形,为类似工程提供了可参考的施工方法.

5 结 论

本文以滇中引水工程某隧洞进口段为工程依托,对断层破碎带隧洞开挖方法进行了优选及施工开挖参数的优化设计,结合现场监测数据探讨了开挖方法及参数的安全性,得出了以下结论:

1)根据对二(微)台阶法、三台阶法及三台阶预留核心土法模拟开挖结果进行的围岩应力分布、各测点位移变化及掌子面稳定性分析,可以得到:二台阶法和三台阶法在隧洞开挖稳定性控制方面存在不足,可能影响施工安全性.本研究表明,三台阶预留核心土法在本工程地质条件下具有更好的安全性.

2)结合多因素效应分析可得:在断层破碎带隧洞施工中,三台阶预留核心土法的一台阶长度和二台阶长度对拱顶沉降具有显著的正相关影响,且二者之间无明显交互效应;一台阶长度对B-C测线收敛影响显著且存在正相关关系;二台阶长度对D-E测线收敛影响较为显著;二台阶长度对拱底变形影响显著、核心土宽度、二台阶长度、一台阶长度均对掌子面挤出位移影响显著,核心土长度对塑性区体积影响较为显著.

3)对于Ⅴ类(特)围岩段的三台阶核心土法的推荐开挖参数为:一台阶长度取0.50D、二台阶长度取0.30D、一台阶高度取0.45D、二台阶高度取0.30D、核心土长度取0.30D、核心土宽度取0.60D、核心土高度取0.25D.该比例关系可适用于不同跨度的隧洞,在类似地质条件下,可根据实际工程需求调整,以优化施工稳定性和安全性.

4)软岩的时效特性在软岩工程中普遍存在,未考虑该特性使得本次研究在其他类似软岩工程中的推广应用受限,无法为更广泛的软岩工程提供全面、准确的指导.

后续研究将聚焦支护强化措施的优化,提高断层破碎带施工的安全性与稳定性.

参考文献:

[1] 吴顺川,胡中亮,耿晓杰,等.基于全位移理论的引水隧洞围岩变形全过程研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(11):181-191.
Wu S C,Hu Z L,Geng X J,et al. Research on whole process of surrounding rock deformation of diversion tunnel based on full displacement theory[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2023,50(11):181-191.

[2] Pu S J,Wu R Q,Wu S C,et al. Analysis of deformation characteristics and failure mechanism of interbedded surrounding rock tunnels based on principal stress difference[J]. International Journal of Geomechanics,2024,24(9):04024197.

[3] Sharifzadeh M,Kolivand F,Ghorbani M,et al. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground-Niayesh tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2013,35:178-188.

[4] Zhu T,Liu Y M. Evaluating construction parameters of HB and CD methods for super large section tunnel:A case study[J]. Scientific Reports,2023,13:15812.

[5] 段慧玲,张林.大跨度公路隧道合理开挖方法对比研究[J].土木工程学报,2009,42(9):114-119.
Duan H L,Zhang L. Comparative study of rational excavation methods for large-span highway tunnels[J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(9):114-119.

[6] Li P F,Zhao Y,Zhou X J. Displacement characteristics of high-speed railway tunnel construction in loess ground by using multi-step excavation method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,51:41-55.

[7] 林可夫,项彦勇.深埋富水岩体隧道三台阶法施工数值模拟和参数优化——以正盘台隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(S1):199-206.
Lin K F,Xiang Y Y. Numerical modeling and parametric optimization of three-bench construction method for Zhengpantai deep tunnel in water-rich rocks[J]. Tunnel Construction,2021,41(S1):199-206.

[8] 张学富,刘佳祥,丁燕平,等.下穿高层建筑特大跨度超大断面偏压隧道施工方法研究[J].铁道学报,2012,34(5):107-113.
Zhang X F,Liu J X,Ding Y P,et al. Methods for excavation of tunnel under biased loading with super-large span and super-

large section passing under high – rise building[J]. Journal of the China Railway Society,2012,34(5):107 – 113.

[9] 丁建隆. 浅埋大跨度隧道的合理施工工法[J]. 中国铁道科学,2005,26(4):77 – 81.
Ding J L. Reasonable method for the construction of shallow – depth and wide – span tunnel[J]. China Railway Science,2005,26(4):77 – 81.

[10] 王伟锋,毕俊丽. 软岩浅埋隧道施工工法比选[J]. 岩土力学,2007,28(S1):430 – 436.
Wang W F,Bi J L. Construction project optimizing of soft rock and shallow buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(S1):430 – 436.

[11] 黄小明,包世波,霍文星,等. 扁平特大断面隧道三台阶法、CD 法开挖对比分析[J]. 公路,2023,68(4):401 –

[12] 李卓霖,李炬,李茂源,等. 富水破碎围岩大断面隧道施工工法研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(S2):585 – 590.
Li Z L,Li J,Li M Y,et al. Study on construction method of a large – section tunnel in rich water and broken surrounding rocks[J]. Modern Tunnelling Technology,2019,56(S2):585 – 590.

[13] 黄锋,朱合华. 开挖进尺对大断面隧道变形的影响[J]. 铁道建筑,2013,53(8):56 – 58.

[14] 周艺,何川,邹育麟,等. 破碎千枚岩隧道施工工法比选试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3):537 – 548.
Zhou Y,He C,Zou Y L,et al. Experimental study of comparison and optimization of tunneling schemes in crushing phyllite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(3):537 – 548.

[15] 郝俊锁. 引水隧洞突涌段变形特征及控制关键技术研究[J]. 铁道建筑技术,2022(2):99 – 103 + 121.
Hao J S. Deformation characteristics and key control techniques of diversion tunnel inrush section[J]. Railway Construction Technology,2022(2):99 – 103 + 121.

[16] 李鹏飞,赵勇,刘建友. 隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J]. 中国铁道科学,2014,35(5):55 – 61.
Li P F,Zhao Y,Liu J Y. Deformation characteristics and control method of tunnel with weak surrounding rock[J]. China Railway Science,2014,35(5):55 – 61.

[17] Cui J Q,Wu S C,Cheng H Y,et al. Composite interpretability optimization ensemble learning inversion surrounding rock mechanical parameters and support optimization in soft rock tunnels[J]. Computers and Geotechnics,2024,165:105877.

[18] 朱永全,李文江. 隧道围岩稳定性及其控制技术研究(软弱围岩隧道施工变形控制技术成果报告)[R]. 石家庄铁道大学,2011.

[19] 朱永全 李文江 赵勇. 软弱围岩隧道稳定性变形控制技术[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

[20] 田书志. 软岩隧道掌子面稳定性位移判定方法及控制技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
TIAN S Z. Displacement criterion method of tunnel stabilityand control strategy research in soft rock[D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2014.

[21] 赵勇. 隧道设计理论与方法[M]. 北京:人民交通出版社,2019.

(编　辑:王丽娟)