

# 复杂工况下高地应力软岩隧道变形特征与影响机制

付大喜<sup>1</sup>, 李世鑫<sup>2</sup>, 翁效林<sup>2</sup>

(1. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为探明高地应力软岩隧道在不同开挖工法下洞周塑性变形和应力重分布的响应特征以及地质强度参数对开挖变形的影响机制, 寻求不同围岩等级下合理的开挖工法体系以及最佳支护时机, 利用数值分析手段, 对四种工法下的围岩应力、塑性区分布及变形失稳展开分析研究。结果表明: (1) 对于软弱围岩, 采用 CRD 法和三台阶临时仰拱法能够有效控制围岩变形、应力和塑性区的发展, 尤其是对拱脚位移的控制效果突出明显, 三台阶法和环形预留核心土法开挖后将在拱脚处产生较大的收敛变形; (2) 采用临时支撑将在支撑及拱脚位置产生明显的应力集中, 实际过程中应加强对此位置的保护, 设置锁脚锚杆或补强注浆提高其强度承载力; (3) 开挖后过早支护没有充分发挥围岩自承能力, 支护不及时围岩内出现松动压力使围岩进入流变状态, 软弱 V 级围岩合理支护时间段应在开挖后荷载释放 10%~30% 内; (4) 拱腰水平收敛整体随侧压力系数的增加而增大, 但当  $K$  为 0.5 时, 拱腰水平位移有从向内收敛迅速向外扩张的趋势; 拱顶以上围岩竖向沉降随侧压力系数的增大而减小。数值模拟结果为类似高地应力软岩隧道设计施工和变形控制提供参考和依据。

**关键词:** 高地应力; 数值模拟; 软岩; 应力释放; 变形规律; Hoek-Brown 强度准则

**中图分类号:** TU455.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2022)03-0345-10

## Deformation characteristics and influence mechanism of soft rock tunnel with high in-situ stress under complex working conditions

FU Daxi<sup>1</sup>, LI Shixin<sup>2</sup>, WENG Xiaolin<sup>2</sup>

(1. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to explore the response characteristics of plastic deformation and stress redistribution around the tunnel under different excavation methods and the influence mechanism of geological strength parameters on excavation deformation, a reasonable excavation method system under different surrounding rock grades was sought. The best support time is to use numerical analysis methods to analyze and study the surrounding rock stress, plastic zone distribution and deformation instability under the four construction methods. The results show that: (1) For weak surrounding rock, the CRD method and the three-step temporary invert method can effectively control the deformation, stress and the development of the plastic zone of the surrounding rock, especially the control effect of the arch toe displacement is obvious. The three-step method After excavation with the ring-shaped reserved core soil method, larger convergence deformation will occur at the arch toe. (2) The use of temporary support will cause obvious stress concentration at the support and arch foot position. In the actual process, the protection of this position should be strengthened, and the lock foot anchor rod or reinforcement grouting should be set to improve its strength bearing capacity. (3) Premature support after excavation did not give full play to the self-supporting capacity of the surrounding rock, and the loose pressure in the surrounding rock caused the surrounding rock to enter the rheological state if the support was not timely. The reasonable supporting period of soft V grade surrounding rock should be within 10%~30% of load release after excavation. (4) The horizontal convergence of the arch waist generally increases with the increase of the lateral pressure coefficient, but when  $k$  is 0.5, the horizontal displacement of the arch waist tends to converge inward and rapidly expand outward; The vertical settlement of the surrounding rock above the vault decreases with the increase of the lateral pressure coefficient. The numerical simulation results provide reference and basis for the design and construction of similar

收稿日期: 2021-06-21

修改稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1934213)

第一作者: 付大喜(1979—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事地下工程和隧道设计方面的研究。E-mail: 25945800@qq.com

high in-situ stress soft rock tunnel and deformation control.

**Key words:** high geostress; numerical simulation; softrock; stress relief; deformation law; Hoek-Brown strength criterion

随着我国隧道工程建设的不断发展,长大深埋公路隧道已经是我国今后隧道及地下工程发展的主要方向.软岩是指在胶结程度差,受构造切割面及风化影响严重或因断裂、节理裂隙发育而削弱的松、散、软、弱岩层,其承载能力极低<sup>[1]</sup>.随着隧道埋深的增加,水平方向上构造地应力分布极不均匀且复杂,极易产生高地应力区,隧道开挖后将扰动初始应力场使围岩应力重分布,当围岩应力不断增大且得不到释放时,应力将高度集中在拱脚等狭窄位置或支护薄弱处,当超过围岩抗压强度时,必然造成围岩严重损伤.对于软岩断面之间将互相挤压、拉裂、蠕动,产生塑性大变形,对于硬岩则产生岩爆现象.为减缓软岩塑性区的发展,衬砌将承受围岩形变压力,使钢架扭曲、衬砌裂损、锚杆拉断、掌子面坍塌,变形速度快且持续时间长,严重影响隧道施工安全与进度<sup>[2-4]</sup>.对于高地应力软岩隧道,确保隧道快速安全施工、充分发挥围岩自稳能力和降低围岩松弛是当前研究中的关键问题.

针对深埋软岩隧道施工过程中出现的围岩失稳塌方以及衬砌病害,来弘鹏<sup>[5]</sup>基于先加载后开洞不同应力场下公路隧道模型试验,再现不同初始地应力场条件下围岩应力分布特征及衬砌结构受力特点,试验表明:不同应力场下洞周应力松弛程度不同,应力场的改变对衬砌切向应力具有较大影响.Zeng等<sup>[6]</sup>通过数值反演和理论分析确定了羊渠河矿深部软岩的应力场分布及变形特征,并根据羊渠河矿巷道锚索-钢架支护系统作用机理提出预应力锚网交互支护的技术方案,并通过现场监测验证了该支护方案的合理性和可靠性.关宝树<sup>[7]</sup>根据软岩隧道变形的基本规律,针对目前国内研究现状并从变形控制的基本要求出发,系统总结了国内外通过超前支护控制先行位移、通过掌子面补强控制挤出位移、通过脚部补强控制脚部下沉以及加强初期支护来控制隧道开挖后变形的基本对策.李冠鹏<sup>[8]</sup>以普氏理论、比尔鲍曼理论为基础,对超前小导管支护体系的力学特性进行研究,并数值模拟了不同环向注浆范围、不同管径和长度的小导管对拱顶沉降和掌子面挤出位移的控制效果,结果表明:随着注浆圈范围及管径的

增大,位移控制效果减缓,应合理布设超前小导管.刘宇鹏<sup>[9]</sup>基于应变软化的弹塑性解建立隧道长短锚杆联合支护力学模型,论证了高地应力软岩隧道对锚杆加长的必要性,建议对于深埋软岩隧道应采取长短锚杆联合支护的策略,与每延米相同用量的短锚杆相比联合支护能够有效降低隧道洞壁处位移.王志杰<sup>[10]</sup>以大梁隧道为例,研究了高地应力条件下不同开挖工法引起的洞周变形和衬砌结构受力特性,研究结果表明:三台阶临时仰拱法和三台阶七步开挖法都能够有效控制洞周位移,但七步开挖多次扰动围岩且支护结构闭环较慢,所以,应根据现场地质条件灵活及时转换工法.

目前,关于高地应力软岩隧道大变形控制理论及施工技术研究取得了丰富的成果,但软岩隧道大变形受地质情况、施工工艺等因素影响较大,且前期研究多从地质强度、施工工法或支护方式的角度来探讨单个施工因素的变化对隧道开挖的影响,缺乏对其组合工况下变形机理的综合分析.因此,本文依托象君山隧道为工程背景,基于Hoek-Brown屈服准则确定岩石力学参数,系统分析了不同岩体强度下采用不同的开挖工法对隧道开挖变形及应力分布的影响规律,并进行支护时机优化探讨,提出抑制隧道大变形控制措施,为实际工程隧道快速施工和技术安全稳定控制提供技术参考及理论研究.

## 1 工程背景

在建象君山隧道是栾卢高速关键控制性工程,位于伏牛山脉北麓,全长5 508 m,属于分离式隧道,隧道最大埋深为390 m,跨越两个断层破裂带.根据地质勘测报告与实地观察,围岩多为风化片岩,以Ⅲ、Ⅳ级围岩为主,Ⅴ级围岩主要集中在两个地质断层带附近,隧址区地质条件复杂,岩性较为软弱,Ⅴ级围岩岩层主要为灰白色强风化片岩,变晶结构,片构造,主要矿物成分为石英、长石等,局部含少量云母,围岩破碎,裂隙发育,部分地段受断层破裂带等软弱结构面控制,施工时处理不当有股状流水或滴水现象,甚至可能产生突泥和塌方.设计施工时,隧道Ⅴ级围岩土质较差段施工时按CRD法或者环形预留核心土

法进行开挖,衬砌按新奥法原理进行设计,严格遵守“管超前,严注浆,短进尺,少扰动,强支护,快加固,早成环,勤量测”的原则.为确保本工程顺利进行,需深入对深埋软岩隧道开挖围岩稳定性及其内部应力与变形演变规律展开系统性研究,并为工程预加固和支护措施提供建议.

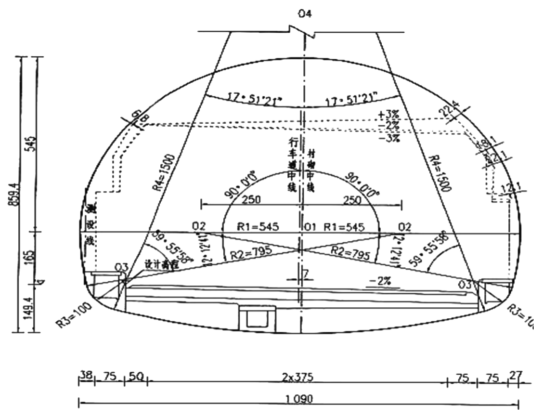


图 1 分离式隧道内轮廓图  
Fig. 1 Separated tunnel interior profile

2 三维隧道动态开挖分析

2.1 Hoek-Brown 常数及广义 H-B 准则

Hoek-Brown 强度准则是霍克等人在参考 Griffith 经典强度理论的基础上,通过大量岩石三轴试验提出的岩体非线性破坏经验准则,其综合考虑了岩体结构面和应力状态等对岩体强度的影响,系统解释了拉应力区、低应力区和最小主应力对岩石强度的影响机理,对各向异性岩体或深埋破碎岩体均适用,其强度估算的普遍公式为<sup>[11]</sup>

$$\sigma_1=\sigma_3+\sigma_{ci}\left(\frac{m_b}{s_{ci}}\sigma_3+s\right)^a\tag{1}$$

表 1 基于 GSI 分类系统和 H-B 准则确定的围岩力学参数表

Tab. 1 Mechanical parameters of surrounding rock determined based on GSI classification system and H-B criterion

GSI	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	$m_i$	扰动程度 $D$	$m_b$	$s$
30	1.3	0.35	114	23.9	14	0.5	0.50	0.000 1
50	4.1	0.35	435	32.1	14	0.5	1.29	0.001 3
70	12.9	0.35	930	40.1	14	0.5	3.36	0.018 3
90	41	0.35	1 300	46.9	14	0.5	8.69	0.263 6

2.2 有限元弹塑性模型

为了更好地反应空间效应,采用有限元软件 Midas GTS 对不同岩石强度参数下隧道施工变形展布规律展开系统性数值分析研究<sup>[17-18]</sup>.隧道围岩按均质弹塑性材料考虑,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,用实体单元模拟.Ⅴ级软弱破碎围岩带开挖前需进行超前支护,超前小导管和超前注浆对围岩的加固效果通过将洞周围岩弹性模量提高

式中:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  为岩体破坏时的最大主应力和最小主应力;  $\sigma_{ci}$  为组成岩体完整岩块的单轴抗压强度;  $m_b$  为岩体的 Hoek-Brown 参数,取值为 0.000 000 1~25;  $s$  为与岩体质量有关的常数,取值为 0~1;  $\alpha$  为有关岩体结构的参数.

$m_b$ 、 $s$  和  $\alpha$  与岩体结构面情况相关且相互独立,可由岩体地质强度指标 GSI 值和扰动程度  $D$  求得.对于严重扰动岩体  $D$  取 1,施工无扰动时  $D$  取 0.其判别公式为

$$s=\exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)\tag{2}$$

$$m_b=m_i\exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)\tag{3}$$

$$\alpha=\frac{1}{2}+\frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15}-e^{20/3}\right)\tag{4}$$

式中:  $m_i$  为完整岩块的 Hoek-Brown 常数; GSI 为地质强度指标<sup>[12-13]</sup>.

考虑爆破开挖及应力松弛对岩体影响,岩体变形模量的估算可采用如下的公式.

当  $\sigma_{ci}<100$  MPa 时

$$E_m=\left(1-\frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\times10^{\frac{GSI-10}{10}}\tag{5}$$

当  $\sigma_{ci}>100$  MPa 时

$$E_m=\left(1-\frac{D}{2}\right)\times10^{\frac{GSI-10}{40}}\tag{6}$$

为了更好地探讨岩体地质强度参数对隧道洞身位移的变化影响规律,取 GSI 分别为 30, 50, 70, 90, 对应围岩等级为Ⅴ、Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ级,并结合霍克布朗屈服准则及《公路隧道设计规范》采用软件 RocLab 估算的岩石力学强度参数如表 1 所示<sup>[14-16]</sup>.

42%~56%,粘聚力提高 35%~51%,内摩擦角提升 2.3~3.4°来等效模拟<sup>[19]</sup>,注浆加固范围为拱顶及上拱腰环向 120°区域.3 mφ22 系统锚杆采用植入式桁架并视为线弹性材料.初期支护采用板单元模拟,厚度为 30 cm,其强度通过将 18 号型钢拱架和钢筋网的弹性模量等效到喷射混凝土的衬砌弹性模量中计算.支护力学参数如表 2 所示.

表2 支护力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of supporting

材料	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松 比	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
注浆加固区	20	1.88	0.35	160	27
系统锚杆	78	200	0.3		
等效初支	22	31.62	0.2		

象君山深埋隧道 ZK55+845~ZK55+915 段平均埋深 200 m, 为简化计算, 取上部隧道埋深 50 m 建模, 其他埋深通过在上部边界施加均布荷载  $q = \gamma h = 5 \text{ MPa}$  等效土体自重, 水平构造地应力通过侧压力系数  $K$  来实现,  $K$  取 1.2. 考虑到模型开挖边界效应, 模型隧道底面距土体底部边界为 4 倍洞径, 左右边界至隧道中心线约为 3.5 倍洞径, 纵向方向取 50 m 的开挖长度, 建立模型尺寸为  $100 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ . 边界约束条件为: 模型前后、左右和底部边界施加垂直于围岩面的法向约束的位移边界, 顶面为自由边界.

为了深入考虑开不同挖工法对岩体变形机制的影响, 对三台阶法、CRD 法、环形预留核心土法及三台阶临时仰拱法进行有限元模拟开挖(开挖循环进尺为 1 m), 并对岩体力学性质与变形状态进行动态分析.

各开挖工法模型洞室网格细部划分如图 2 所示.

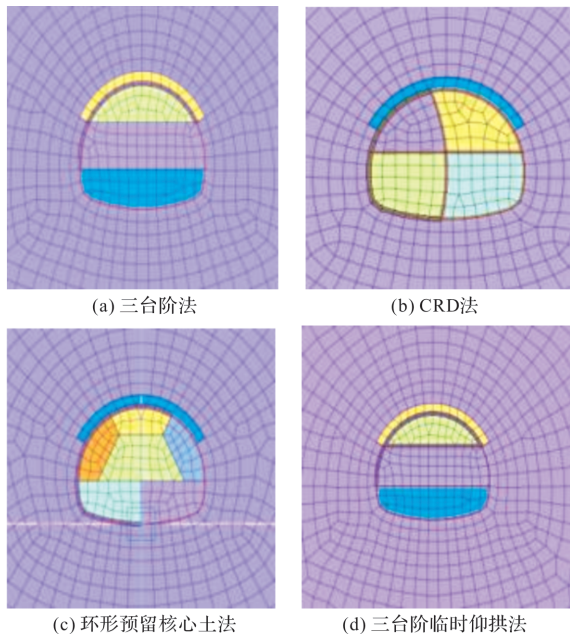


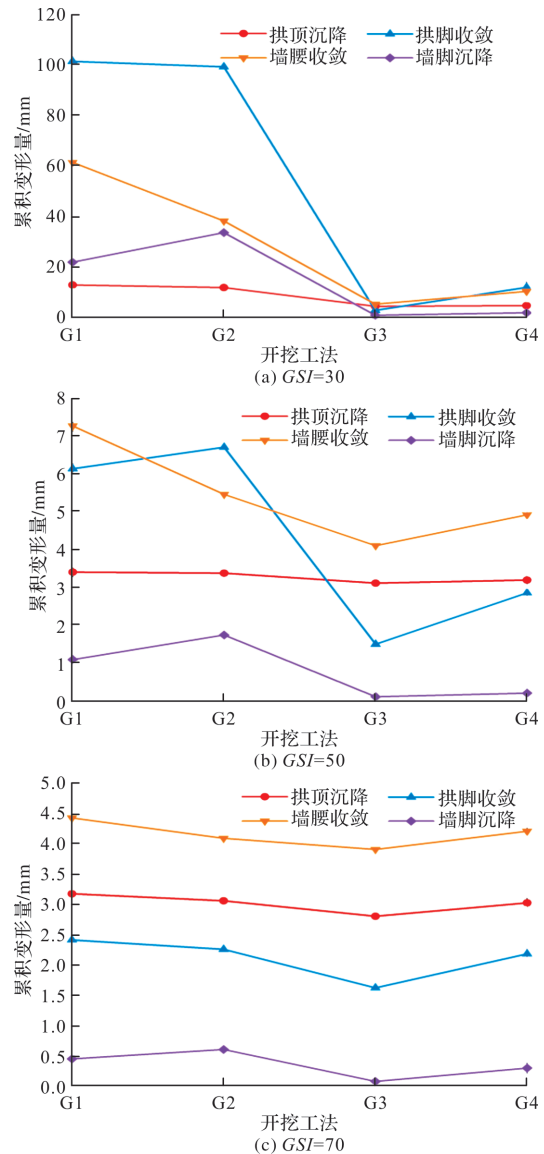
图2 各开挖工法模型洞室网格细部划分示意图

Fig. 2 Diagram of mesh division of each excavation method

### 2.2.1 围岩变形分析

图3为不同岩石强度参数下采用四种开挖工法对隧道开挖结束后中间断面洞周沉降和收敛变形

的影响. 根据结果所示, 对于围岩破碎、节理发育的软弱岩体, 采用 CRD 法或三台阶临时仰拱法开挖时隧道拱脚收敛位移约为三台阶或环形预留核心土开挖时拱脚位移的 2%~3%, 墙腰水平收敛位移约为后者的 9%~14%, 拱顶沉降也随开挖工法的改变有缓慢下降的趋势. 当  $GSI$  为 50 时, 岩石强度相对良好, 此时采用 CRD 法及三台阶临时仰拱法对变形的控制效果虽然不如较差围岩时表现突出, 但均明显优于三台阶与环形预留核心土开挖. 当  $GSI$  为 50 和  $GSI$  为 70 时, 对于稳定岩体, 无论采用何种开挖工法都能很好地控制变形, 且洞周变形已经趋于稳定. 因此当围岩强度较差时, 优先采用 CRD 法或环形预留核心土法进行开挖, 对大变形有良好控制效果, 当围岩具有一定强度时, 由于不同开挖工法对围岩变形控制效果区别不大, 且围岩有不错的自承能力, 因此, 可以采用三台阶法或全断面法开挖, 成环较快, 工期较短, 节约造价.



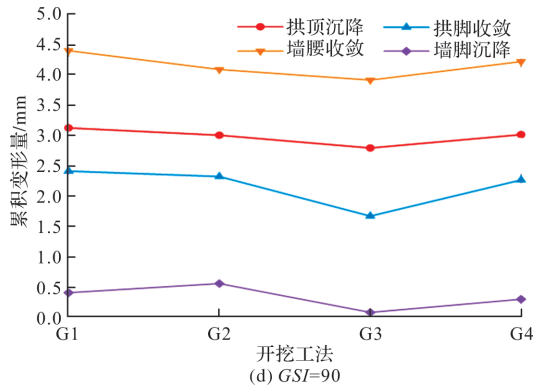


图3 不同岩体强度下各工法洞周位移变化

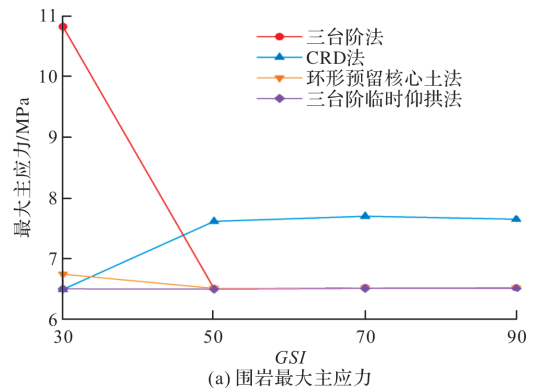
Fig. 3 Variation of circumferential displacement under different rock mass strength

可以明显看出,对于稳定性差的软岩( $GSI=30$ ),采用三台阶或预留核心土法开挖时,由于没有临时支撑抵抗围岩向临空面挤压变形的压力,且围岩自身承载力不足,开挖断面支护后,在围压作用下,支护结构脚部将产生向下的位移,围岩松弛区域扩大且洞周产生大变形,变形以拱脚处最为突出。因此必须加强软弱围岩开挖时对拱脚的补强,提高基底承载力,脚部围岩补强以减少接地应力(加肋钢支撑)为目的或提高拱脚承载力(打入脚部锚杆或水平锚管等)为目的,而对于稳定性好、强度高的围岩拱脚变形量相对拱顶沉降量较小<sup>[7]</sup>。而三台阶临时仰拱法以及CRD法通过分割隧道面并设置临时支撑使隧道暂时形成早期闭合构造,有效地减少了拱腰与拱脚变形,但是在断面成环及拆除临时支撑时这两种方法将产生较大变形量,施工过程中因根据围岩变形情况进行小心作业。

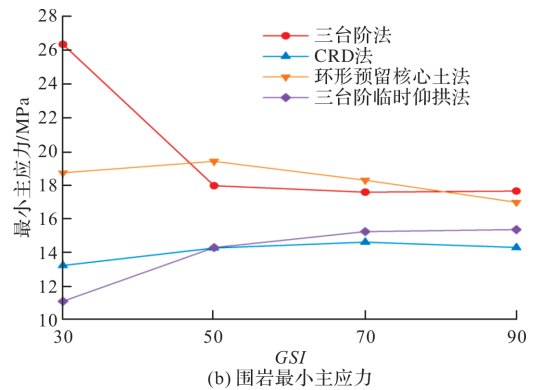
### 2.2.2 围岩主应力状态分析

分析不同地质强度指标  $GSI$  下的围岩主应力变化趋势,如图4所示,当岩体地质强度较差( $GSI=30$ )时,采用三台阶法开挖将产生较大的压应力,不利于围岩稳定,洞周也将产生较大变形量,结合图3,其拱脚收敛达到101.3 cm,墙腰收敛达到61.44 cm;随着围岩强度的提高,采用三台阶法开挖对围岩应力的控制效果趋于稳定,此时沉降与收敛变形量也显著减少。采用三台阶临时仰拱法、CRD法及环形预留核心土法开挖后,围岩最大主应力和最小主应力值随岩体强度的增加变化不大,相对于强度较高围岩此时对V级软岩也有明显的应力控制效果。因此采用三台阶法开挖方式对地质强度要求较高,对于深埋V级软岩隧道,不宜采用三台阶法施工,此时无论是围

岩应力或者洞周变形均不能得到有效的控制,若应力过大超过围岩抗压强度,岩体将产生塑性松弛区域且丧失稳定。



(a) 围岩最大主应力



(b) 围岩最小主应力

图4 各工法围岩主应力随岩体强度变化趋势

Fig. 4 Main stress of surrounding rock varies with the strength of rock mass

考虑实际工程V级破碎软岩围岩施工变形大,技术要求高,因此,对 $GSI=30$ 时软弱围岩模拟结果作主要分析。根据圣维南原理,提取模型中间断面围岩最大主应力和最小主应力值,根据表3,结果表明采用CRD法开挖对围岩最大主应力的控制效果相对于三台阶法和环形预留核心土法提升了39.9%和3.7%,最小主应力的控制效果提升了49.7%和29.3%。采用三台阶临时仰拱法开挖对最大主应力的控制效果相对于三台阶法和环形预留核心土法提升了39.8%和3.6%,最小主应力的控制效果约提升了57.8%和40.5%。

表3 中间断面围岩主应力状态

Tab. 3 principal stress state of surrounding rock in middle section

GSI	开挖工法	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa
30	CRD法	6.50	13.24
30	环形预留核心土法	6.75	18.73
30	三台阶临时仰拱法	6.51	11.13
30	三台阶法	10.81	26.33

根据各监测点主应力提取结果,由图5可知,无论采取哪种工法开挖,相对于其他监测点,拱脚都是压应力值较大处,尤其是三台阶法施工在拱脚处最容易发生围岩流变现象,拱腰也由于台阶开挖产生狭窄三角区导致应力分布较大,其拱顶及拱腰应力值则相对较小。环形预留核心土法、CRD法和三台阶临时仰拱法对各监测点应力整体控制效果显著优于三台阶法;由于中隔壁和临时仰拱的存在,CRD法拱顶的应力值较大而对拱腰应力值控制效果最好,三台阶临时仰拱法在拱腰位置处应力值较大,但其对拱脚应力的控制效果在四种开挖工法中最优。因此,在施工过程中,采取不同的开挖工法时,应加强对其相应位置应力集中处进行补强增强其承载能力,可以通过打入锁脚锚杆或在拱脚和临时支撑处围岩内补强注浆进行加固。

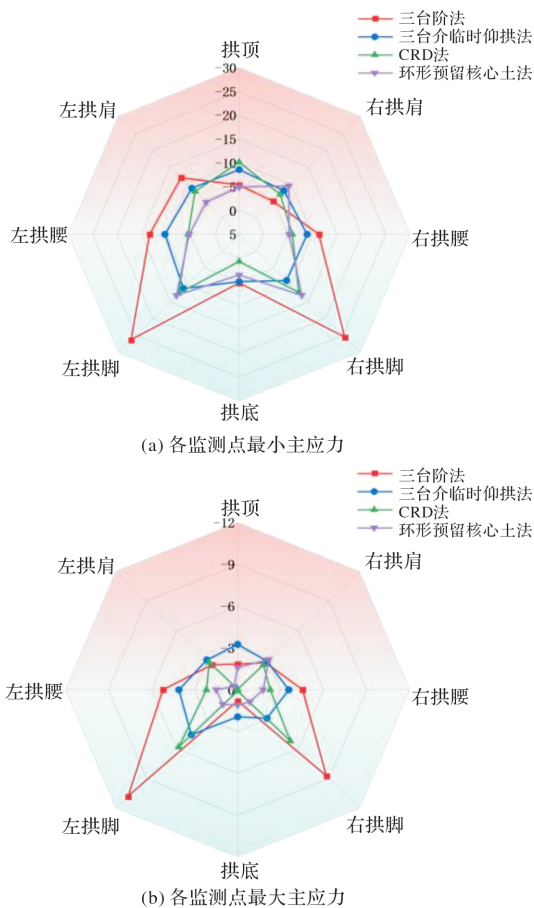


图5 围岩各监测点主应力提取结果

Fig. 5 Principal stress of surrounding rock's monitoring point

### 2.2.3 围岩塑性区分布分析

分析不同工法对Ⅴ级软岩状态下塑性区范围的控制效果,由围岩塑性区结果图6可知,三台阶法产生的塑性范围最大,主要集中在两拱腰、拱底与拱脚,在拱脚与拱底产生严重破坏区,在这

个位置处需加强支护。CRD法和三台阶临时仰拱法能够有效减小塑性区范围,且在拱脚处,CRD法开挖有对拱脚变形控制效果最为良好,三台阶临时仰拱法也有减弱此区域内围岩塑性延展的趋势。开挖结束后,三台阶、三台阶临时仰拱和预留核心土开挖法的塑性区厚度和向岩体深部扩展趋势有向注浆加固区域缓慢减小的趋势,拱顶区域内塑性变形最小,说明超前注浆加固能够有效地控制岩体产生塑性流变;而CRD法开挖由于中隔壁的存在,明显抑制住了拱脚和拱顶钢支撑处的塑性区发展,拱顶的塑性区厚度相对于拱腰有所增大,但整体来说洞周变形远小于其他工法开挖。

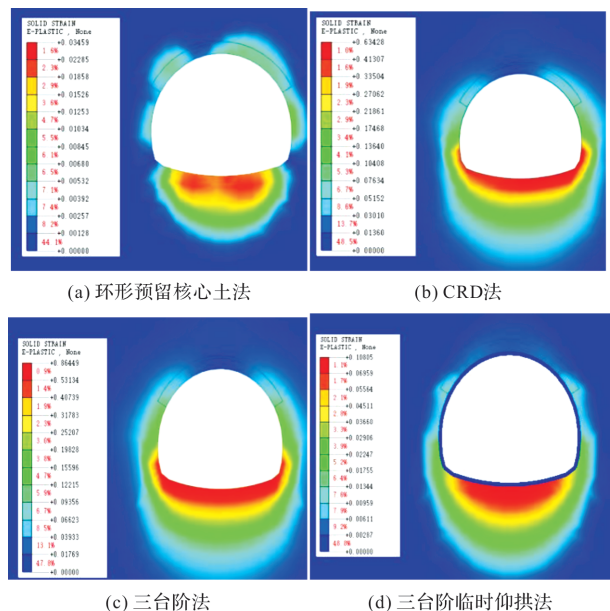


图6 Ⅴ级围岩塑性区分布图

Fig. 6 V grade surrounding rock plastic separation layout

## 3 软岩隧道支护时机优化

### 3.1 软岩隧道支护原理

软岩隧道支护理论允许其塑性圈的产生,何满潮认为软弱围岩即将出现松动破坏区时即为最佳支护时机,假设隧道开挖后使围岩向临空区运动各种力的合力为 $P_T$ ,软岩隧道支护原理可表示为<sup>[20]</sup>

$$P_T = P_D + P_R + P_S \quad (7)$$

由上式可以看出使围岩变形的合力 $P_T$ 是由三部分力分担,第一部分 $P_D$ 在隧道开挖后将通过岩石形变释放一部分弹塑性能,第二部分 $P_R$ 由围岩自身承载,承载能力取决于围岩强度及支护时机,但第三部分 $P_S$ 由工程支护承担,现行支护理论研究应找到 $P_D$ 与 $P_R$ 合力最大点,由 $P_D$ 与 $P_R$ 随时间变化曲线知, $T_S$ 时机进行支护即为围岩自承力

与变形能转换的工程力合力的峰值. 由于工程中难以确定最佳支护时机, 因此, 可在最佳支护时间段 $[T_{S1} \sim T_{S2}]$ 内进行支护.

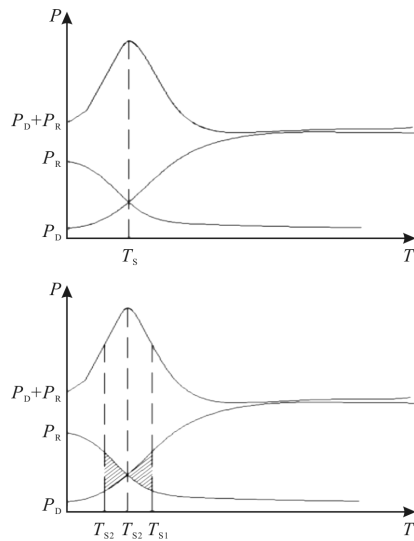


图 7 最佳支护时机  $T_s$  及最佳支护时段 $[T_{S1} \sim T_{S2}]$ 示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of optimal supporting time  $T_s$  and optimal supporting period $[T_{S1} \sim T_{S2}]$

3.2 基于 LDF 的开挖时间效应分析

设置八个工况, 通过改变每个循环进尺荷载释放系数 LDF 来研究 V 级软岩隧道(侧压力系数取 1.2)开挖时合理的支护时机(表 4). 荷载释放系数通过定义相邻施工阶段围岩开挖已释放荷载占总开挖荷载的百分比来模拟实际过程隧道开挖的时间效应和应力释放过程, 适当调整荷载释放系数可以把当前开挖产生的应力适当分配给下一步激活的模拟单元(如支护、衬砌等).

表 4 隧道开挖后围岩荷载释放系数 LDF 设置

Tab. 4 Setting of load release coefficient LDF of surrounding rock after tunnel excavation

工况	开挖阶段荷载释放比例	支护阶段荷载释放比例
工况 1	0(立即支护)	1
工况 2	0.1	0.9
工况 3	0.2	0.8
工况 4	0.3	0.7
工况 5	0.4	0.6
工况 6	0.5	0.5
工况 7	0.6	0.4
工况 8	0.7	0.3

如图 8 所示, 随着开挖阶段荷载释放比例的增大, 即支护时间的延迟, 洞周围岩变形值总体呈增大趋势, 当开挖阶段荷载释放 10% 时, 拱顶沉降及拱腰收敛变形都为最小值, 此时进行支护也能够充分释放围岩形变能, 即为最佳支护时机.

当开挖阶段释放 20%~30% 时, 拱顶沉降缓慢增加, 而拱腰收敛及拱脚收敛变形平稳, 与立即支护的围岩变形量基本相同, 但与立即支护相比, 此时, 段内进行支护可以减少隧道后期变形时施加在支护结构上的荷载, 对围岩稳定变形亦能产生良好控制效果. 当开挖后释放荷载比例大于 30% 时, 拱腰与拱脚收敛位移速度加快, 说明支护不及时, 大大降低了初期支护的控制效果. 因此, 对于软岩隧道实际工程施工中, 合理支护时机应在开挖后荷载释放 10%~30% 时间段内, 坚持“抗放结合”的原则, 避免支护太早, 不能充分发挥围岩自承能力, 同时也不能支护太晚, 造成围岩坍塌. 对于应力值较高的深埋隧道, 施工过程  $T$  时刻的荷载释放比例应根据围岩松动压力理论公式<sup>[21]</sup> 及现场  $T$  时刻的监测应力值共同确定<sup>[22]</sup>.

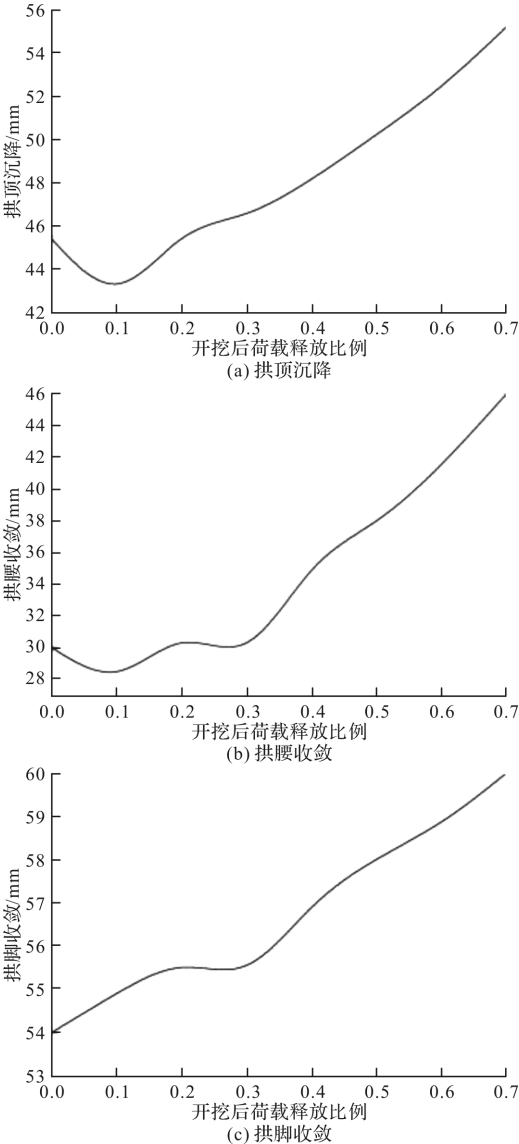


图 8 洞周位移随开挖后荷载释放比例变化趋势图  
Fig. 8 Trend of displacement around tunnel with the proportion of load release after excavation

#### 4 不同水平应力下围岩位移特征

对不同水平构造地应力下软岩隧道的拱顶沉降及水平收敛变形展开研究. 开挖工法采用 CRD 法. 水平构造地应力的改变通过改变侧压力系数来实现, 侧压力系数分别取 0.5、0.8、1.2、1.5、2. 由图 9(a)所示, 当  $K$  为 0.5 时, 在第 42 个施工步到第 44 个施工步拱腰水平位移有从向内收敛迅速向外扩张的趋势, 是因为此时目标断面开挖完全断面成环后, 需要拆除中隔壁和临时仰拱, 围岩荷载释放增大, 由于水平地应力仅为垂直地应力的一半, 在失去了临时支撑对变形抑制和应力承载作用时, 隧道围岩水平应力不足以抵抗垂直地应力作用下隧道向下沉降变形的趋势, 洞身侧壁将在水平方向发生回弹变形, 围岩主要以下沉变形为主, 施工时在断面变形稳定后应分批拆除临时支撑, 防止围岩变形速度过快. 当  $K$  为 0.8、1.2、1.5、2 时, 拱腰在水平应力作用下向内收敛, 在断面开挖完毕后收敛速度最快, 且收敛位移量随着侧压力系数的增加不断增大.

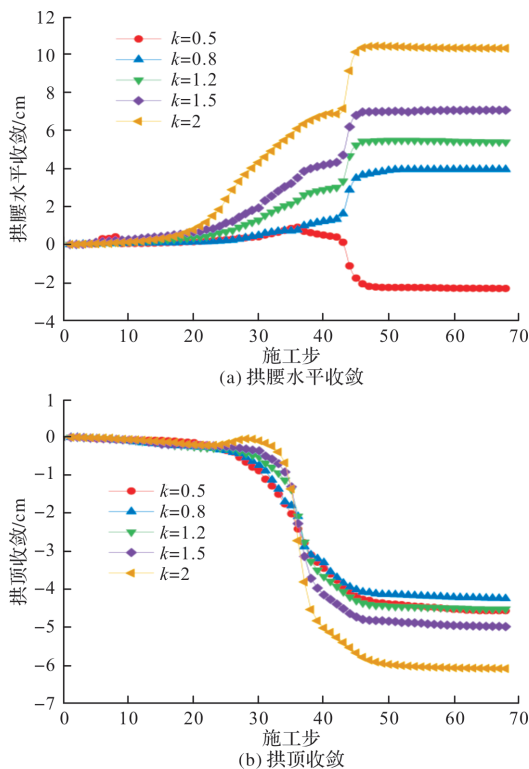


图 9 洞周局部位移随侧压力变化趋势图

Fig. 9 Trend of displacement around hole with lateral pressure

洞周拱顶沉降随侧压力系数的增加整体呈增大趋势, 但这种趋势仅发生在洞周拱顶局部范围内, 由图 10 可知, 拱顶垂直方向上远离洞室围岩区域的竖向沉降随水平地应力的增大不断减少, 而拱肩两侧以上围岩区域竖向沉降随水平地应力

增大而不断增大, 这是由于水平向应力不断挤压围岩土体, 在隧道开挖面顶端产生土拱效应. 隧道开挖后由于应力释放, 在土拱底部发生挤压变形, 随着侧压力系数的增加, 挤压变形也越来越大, 拱顶范围内围岩局部发生松弛, 此位置处竖向沉降量也随之增大; 而在拱顶远离开挖面位置处, 由于受开挖扰动较小, 且竖向变形是水平应力和垂直应力共同作用的结果, 水平应力向内挤压不断抵抗岩体向下竖向变形的趋势, 其沉降量将随水平地应力的增加不断减小, 而围岩两侧竖向沉降量则随水平地应力的增加不断增大, 当水平地应力为垂直地应力的两倍时, 在拱顶以上区域围岩挤压隆起.

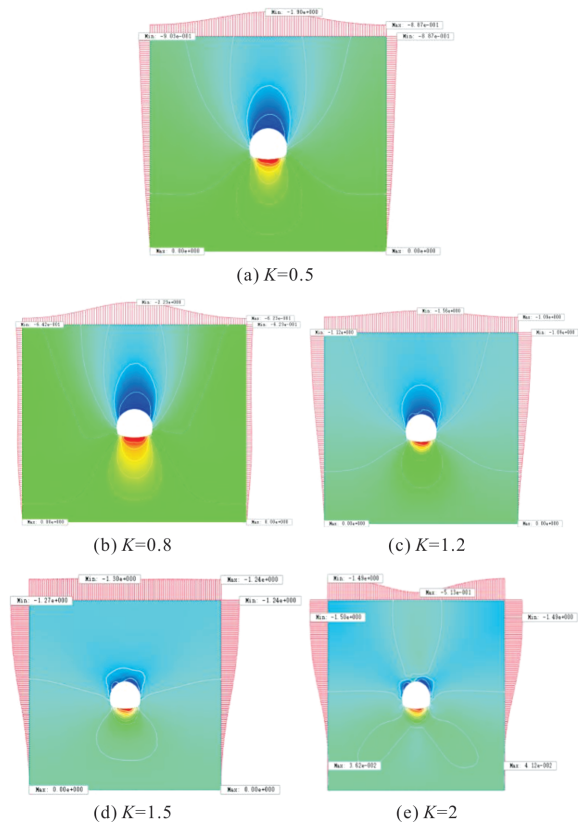


图 10 岩体沉降量随侧压力系数变化趋势

Fig. 10 Settlement of rock varies with lateral pressure coefficient

#### 5 结论

(1) 针对不同的地质强度指标下的围岩, 提出四种开挖工法, 对其洞周沉降变形及围岩应力、塑性区变化展开规律性研究. 研究结果表明: 当围岩地质强度较弱时, 采用三台阶临时仰拱法和 CRD 法能够有效地控制围岩开挖时洞周变形, 拱脚收敛位移约为其他工法开挖时拱脚位移的 2%~3%, 墙腰水平收敛位移约为后者的 9%~14%, 拱顶沉降也有下降的趋势;

(2)无论采用哪种工法,拱脚位置都是压应力值较大处,三台阶法施工在拱脚处最容易发生围岩流变现象;CRD法对拱腰应力控制效果最好,而在拱顶临时支撑处产生应力集中;三台阶临时仰拱法在拱腰位置处应力值较大,但其对拱脚应力的控制效果最优;

(3)随着开挖阶段荷载释放比例的增大,洞周围岩变形整体呈增大趋势,开挖后释放20%~30%时,拱顶沉降缓慢增加,拱腰、拱脚收敛变形平稳,工程中合理支护时间段应在开挖后荷载释放10%~30%内;

(4)当 $K$ 为0.8、1.2、1.5、2时,拱腰在水平应力作用下向内收敛,且收敛位移量随着侧压力系数的增加不断增大;当 $K$ 为0.5时,拱腰水平位移由从向内收敛迅速向外扩张.隧道拱顶局部范围内由于水平应力的挤压,拱顶沉降随侧压力系数共同增大,而拱顶上方远离隧洞的围岩竖向沉降随水平地应力的增大不断减少;

(5)针对高地应力软岩隧道变形规律的研究采用数值模拟的方法且围岩参数、地质强度指标与实际情况有所偏差,为更准确地探究不同条件下的岩体变形机制,应进一步根据现场监测数据进行系统分析,并与理论研究相结合,为深埋软岩隧道施工提供技术参考.

## 参考文献 References

[1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6): 1081-1106.  
SUN Jun. Research progress of rock rheological mechanics and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(6): 1081-1106.

[2] 魏来, 刘钦, 黄沛. 高地应力软岩隧道大变形机理及控制对策研究综述[J]. 公路, 2017, 62(7): 297-306.  
WEI Lai, LIU Qin, HUANG Pei. A review on large deformation mechanism and control measures of soft rock tunnel with high in-situ stress[J]. Highway, 2017, 62(7): 297-306.

[3] EVERT Hoek. Big tunnels in bad rock[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2001, 127(9): 726-740.

[4] 陈卫忠, 田云, 王学海, 等. 基于修正[BQ]值的软岩隧道挤压变形预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3125-3134.  
CHEN Weizhong, TIAN Yun, WANG Xuehai, et al. Prediction of compressive deformation of soft rock tunnel based on modified[BQ] value[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2019, 40(8): 3125-3134.

[5] 来弘鹏, 林永贵, 谢永利, 等. 不同应力场下软弱围岩公路隧道的力学特征试验[J]. 中国公路学报, 2008(4): 81-87.  
LAI Hongpeng, LIN Yonggui, XIE Yongli, et al. Experimental study on mechanical characteristics of highway tunnel in soft surrounding rock under different stress fields[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008(4): 81-87.

[6] ZENG Xiantao, JIANG Yaodong, JIANG Cong, et al. Rock roadway complementary support technology in Fengfeng mining district[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(6): 791-798.

[7] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 1-17.  
GUAN Baoshu. Deformation and control technology of tunnel in soft surrounding rock[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(1): 1-17.

[8] 李冠鹏. 断层破碎带处隧道开挖方法和超前小导管注浆对变形控制效果研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.  
LI Guanpeng. Study on tunnel excavation method in fault broken zone and control effect of advance small pipe grouting on deformation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.

[9] 刘宇鹏, 夏才初, 吴福宝, 等. 高地应力软岩隧道长、短锚杆联合支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 105-114.  
LIU Yupeng, XIA Caichu, WU Fubao, et al. Research on combined support technology of long bolt and short bolt in soft rock tunnel with high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 105-114.

[10] 王志杰, 许瑞宁, 袁晔, 等. 高地应力条件下隧道施工方法研究[J]. 铁道建筑, 2015(9): 50-52.  
WANG Zhijie, XU Ruining, YUAN Ye, et al. Study on Construction Method of Tunnel under High Ground Stress Condition[J]. Railway Construction, 2015(9): 50-52.

[11] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown criterion-2002[C]//Proc NARMS-TAC Conference. Toronto: University of Toronto, 2002: 267-273.

[12] 彭俊, 荣冠, 王小江, 等. 完整岩石 Hoek-Brown 屈服准则参数  $m_i$  的经验模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(11): 4617-4623.  
PENG Jun, RONG Guan, WANG Xiaojiang, et al. An empirical model of Hoek-Brown yield criterion parameter  $m_i$  for intact rock[J]. Journal of Central South

- University ( Science and Technology ), 2013 ( 11 ): 4617-4623.
- [13] 王新刚,胡斌,王家鼎,等. 基于 GSI 的 Hoek-Brown 强度准则量化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34 (S2):3805-3812.
- WANG Xingang, HU Bin, WANG Jiading, et al. Quantitative study on Hoek-Brown strength criterion based on GSI[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 3805-3812.
- [14] 盛佳,李向东. 基于 Hoek-Brown 强度准则的岩体力学参数确定方法[J]. 采矿技术,2009,9(2):12-14,41.
- SHENG Jia, LI Xiangdong. Determination of rock mechanics parameters based on Hoek-Brown strength criterion[J]. Mining Technology, 2009, 9 (2): 12-14,41.
- [15] 王成虎,何满潮. Hoek-Brown 岩体强度估算新方法及其工程应用[J]. 西安科技大学学报,2006(4):456-459,464.
- WANG Chenghu, HE Manchao. A new method for strength estimation of Hoek-Brown rock mass and its application in engineering[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006 (4): 456-459,464.
- [16] 胡盛明,胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. 岩土力学,2011,32 (3):861-866.
- HU Shengming, HU Xiuwen. Estimation of rock mechanics parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(3): 861-866.
- [17] 陈志敏. 高地应力软岩隧道围岩压力研究和围岩与支护结构相互作用机理分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.
- CHEN Zhimin. Study on surrounding rock pressure and interaction mechanism between surrounding rock and supporting structure in soft rock tunnel with high geostress[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012.
- [18] HENG Zhang, LIANG Chen, YIMO Zhu, et al. Stress field distribution and deformation law of large deformation tunnel excavation in soft rock mass[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5).
- [19] 黄彦波. 基于新意法的高地应力软岩隧道施工技术研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
- HUANG Yanbo. Research on construction technology of soft rock tunnel with high geostress based on new method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019
- [20] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程地质力学研究进展[J]. 工程地质学报,2000(1):46-62.
- HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Research progress in engineering geomechanics of soft rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2000(1): 46-62.
- [21] NG C W, LEE K M, TANG D K. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 523-539.
- [22] 林贤文. 既有双洞隧道原位扩建力学性能研究[D]. 福州:福建工程学院,2021.
- LIN Xianwen. Study on mechanical properties of existing double-tunnel in-situ extension[D]. Fuzhou: Fujian Institute of Technology, 2021.

(编辑 吴海西 沈 波)