

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.11

基于强度折减法的软弱泥岩隧道围岩稳定性分析

武亚遵^{1,2}, 田方正¹, 林云^{1,2}, 文桥³

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3. 九江地质工程勘察院, 江西 九江 332000)

摘要: 由强度折减法确定的稳定性系数在差异较小时, 难以确定最优开挖方法。为此, 本文以蒙华铁路申家洼软弱泥岩隧道为例, 借助 FLAC^{3D} 软件, 通过强度折减法确定三台阶七步法、三台阶临时仰拱法、中隔壁法、弧形导坑法等不同开挖方法的稳定性系数, 对比不同方法开挖支护后不同部位塑性区面积比, 确定最适宜的开挖方法。而后详细分析了最适宜开挖方法开挖支护后围岩的位移变化量、应力分布和塑性区变化特征。结果表明: 三台阶临时仰拱法稳定性系数较大, 塑性区面积比较小, 为最适宜的开挖方法。采用该方法开挖后, 隧道变形主要分布在拱顶、拱腰和仰拱部位。施加临时仰拱可有效抑制塑性区的发展, 但拆除会造成应力的集中。

关键词: 软弱泥岩隧道; 强度折减; FLAC^{3D}; 三台阶临时仰拱法

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0065-07

Analysis on the tunnel surrounding rock stability of weak mudstone based on strength reduction method

WU Yazun^{1,2}, TIAN Fangzheng¹, LIN Yun^{1,2}, WEN Qiao³

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
2. Key Lab Biogen Traces & Sedimentary Minerals Hena, Jiaozuo, Henan 454000, China;
3. Jiujiang Geo-Engineering Exploration Institute, Jiujiang, Jiangxi 332000, China)

Abstract: When the difference between the safety factors determined by the strength reduction method is small, it is difficult to determine the optimal excavation method. In order to solve this problem, this paper takes the Shenjiawa weak mudstone tunnel of the Menghua Railway as the research object, through the strength reduction method using FLAC^{3D} software, to determine the values of safety factor under different excavation methods. Comparing the plastic zone area ratios of different parts of the tunnel, the best excavation method is determined, and the displacement, stress distribution and plastic zone change characteristics of the surrounding rock after excavation and support are analyzed in detail. The results show that the safety factor of three-bench temporary lateral bracing method is larger and the area of plastic zone is smaller, which is the most suitable excavation method. After excavation using this method, the tunnel deformation is mainly distributed in the vault, arch waist and invert part. Applying a temporary inverted arch can effectively inhibit the development of plastic zone, while the disassembly will cause the concentration of stress.

Keywords: weak mudstone tunnel; strength reduction; FLAC^{3D}; three-bench temporary lateral bracing method

收稿日期: 2017-12-28; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772153)

第一作者: 武亚遵(1981-), 男, 河南鲁山人, 水文学及水资源专业, 博士, 副教授, 主要从事水文地质工程地质方面的研究工作。E-mail: wuyazun@163.com

通讯作者: 林云(1983-), 女, 湖北襄阳人, 自然地理学专业, 博士, 讲师, 主要从事水文地质及水文过程方面的研究。E-mail: ylz5211@sina.com

在围岩强度低,成岩作用弱的泥岩地层开挖隧道,围岩对工程扰动极其敏感,隧道的开挖方法对围岩的稳定性影响较大^[1]。因此选择适宜的开挖方法对围岩的稳定和隧道的安全施工具有重要的指导意义,为此诸多学者进行了大量的研究^[2]。王金明等^[3]采用数值模拟对大跨度浅埋暗挖隧道的开挖方法进行研究,得出不同工法开挖后的地表沉降量。杨红军等^[4]通过改变隧道埋深和开挖方法进行对比分析,得出二衬支护的最佳时机。汪波等^[5]通过对不同开挖方法对既有隧道的影响进行分析,确定了稳定性最佳的开挖方法。上述研究虽然从不同的角度探讨了开挖方法对围岩稳定性影响,但均未采用统一的指标对岩体稳定性进行量化,而起源于极限分析思想的强度折减法为此提供了借鉴^[6]。由于该方法可以定量的评价隧道围岩稳定性,因此,一经提出就得到了广泛的研究和应用。郑颖人院士带领的团队分析了岩体参数对塑性区的影响,并判定了不同状态下围岩的破坏条件^[7-9]。侯瑞彬等^[10]应用强度折减法研究了隧道不同施工工序的稳定性系数动态变化规律。邓建林等^[11]通过强度折减法计算了不同工况下的稳定性系数,并得出地质条件改变时的变化规律,确定开挖方法转换的最佳时机。尽管诸多学者运用强度折减法对围岩稳定性做了大量研究,但当稳定性系数相近时,仅靠数值判断围岩稳定性得出的结果势必产生偏差。

为此,本研究以蒙华铁路申家洼隧道为例,采用 ANSYS 建立网格后导入有限差分软件 FLAC^{3D} 建立三维模型,而后通过强度折减法探讨三台阶七步法、三台阶临时仰拱法、中隔壁法、弧形导坑法等不同方法开挖下的稳定性系数,并综合隧道不同部位的塑性区面积比确定适宜的开挖方法,最后从位移变化量、应力分布和塑性区变化特征等方面分析最适宜开挖方法的围岩稳定性,为隧道安全施工提供技术支撑。

1 强度折减法原理

1.1 强度折减法

强度折减法主要是根据 Mohr-Coulomb 准则^[12],通过不断折减土体的强度参数,按照式(1)、(2)将黏聚力 c 和内摩擦角 φ 进行折减,直至塑性应变发生突变,即围岩剪切破坏,此时的折减系数即为稳定性系数。

$$c_F = c_0 / K \quad (1)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}((\tan \varphi_0) / K) \quad (2)$$

式中: c_0 、 c_F ——围岩初始和极限状态下的黏聚力;

φ_0 、 φ_F ——围岩初始和极限状态下的内摩擦角;

K ——稳定性系数。

1.2 围岩强度参数

岩体变形模量是研究隧道围岩变形时非常重要的参数,本文采用 Hoek-Brown 准则来估算围岩的强度力学参数^[13-14]。该方法先用地质强度指标 GSI 描述岩体质量,然后通过经验公式来确定岩体强度指标^[15]。这不仅能够考虑岩体因开挖而造成的扰动及损伤影响,而且由于 GSI 体系综合岩体结构和结构面来评定岩体质量,因此能够较合理地估算风化岩体的抗剪强度参数。

Hoek-Brown 强度准则是 E. Hoek 等人在大量试验基础上提出的岩体非线性破坏经验准则,并于 2002 年进行了修正,其公式为^[16-17]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (3)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (4)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (5)$$

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

式中: σ_1 、 σ_3 ——岩体破坏时的最大、最小主应力;

σ_{ci} ——完整岩石的单轴抗压强度;

m_b 、 α 、 s ——与岩体特性有关的材料常数;

D ——岩体扰动参数;

m_i ——岩石材料常数;

GSI ——地质强度指标。

等效的 Mohr-Coulomb 强度参数,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 可用下式确定:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha) + 6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad (7)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2\alpha)s + (1-\alpha)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha) \sqrt{\frac{1 + [6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}]}{[(1+\alpha)(2+\alpha)]}}} \quad (8)$$

式中: $\sigma_3 = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$

当 $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa 时,其变形模量为:

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \quad (9)$$

1.3 失稳判据

采用数值分析方法对岩土体进行稳定性分析时,如何运用强度折减法找到临界破坏时的折减系数,即如何选择破坏判据,是解决问题的关键。目前主要有三种:计算收敛判据;塑性区的贯通判据和特征点的位移突变判据^[18],此处将采用特征点的位移突变确定稳定性系数。

2 工程概况及模型建立

蒙华铁路申家洼隧道地处黄土梁峁区,上部覆盖厚层黄土,厚度约 45 m,下部为全风化至强风化泥岩,厚度约 55 m,强度低,成岩作用弱。由地质勘查资料可知,围岩节理裂隙较发育,总体上属于 V 级围岩。隧道拟采用马蹄形(曲墙拱形)断面施工,由 Hoek-Brown 强度准则可得如表 1 所示的围岩体物理力学参数。

表 1 隧道围岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the surrounding rock mass of tunnel			
	砂质新黄土	全风化泥岩	初期支护
密度/(g·cm ⁻³)	1.84	2.04	2.2
内摩擦角/(°)	26.63	27	
黏聚力/kPa	15.53	80	
弹性模量/MPa	5.81	329	25 300
抗拉强度/kPa	20	40	

区内隧道开挖高度 8 m,跨度 10 m,为减小边界条件对研究区域的影响,按照圣维南原理,6 倍洞室半径外所受应力的影响可以忽略不计^[19],因此,模型底部及左右两侧边界范围取 6 倍洞室的半径。综合隧址区工程地质条件,模拟模型尺寸为宽 70 m,高 90 m,厚 40 m,网格共 287 320 个,结点共 301 104 个。在模型的前后、左右两侧及底部设置位移边界为滚动边界,即固定法向位移边界,顶部设置为自由边界,不施加应力边界。隧道掘进于新近系中新统全风化泥岩中,区内构造不发育,地应力主要是由上覆岩土体在重力作用下产生的自重应力,因此,在模型中通过设置重力加速度后的初次平衡得到初始地应力场。

隧道围岩采用实体单元,初期支护采用自带的壳单元(shell),在计算过程中,由于围岩分布均匀,因此假定围岩为各向同性材料,隧道开挖通过 FLAC^{3D} 中的空模型实现。围岩材料采用摩尔-库伦本构模型,初期支护采用弹性模型(图 1)。

在隧道施工中,开挖方法对围岩稳定,施工安全、效率及工期等有重要的影响。为确定最适宜的开挖方法,本文对三台阶七步法、弧形导坑法、三台阶临时仰

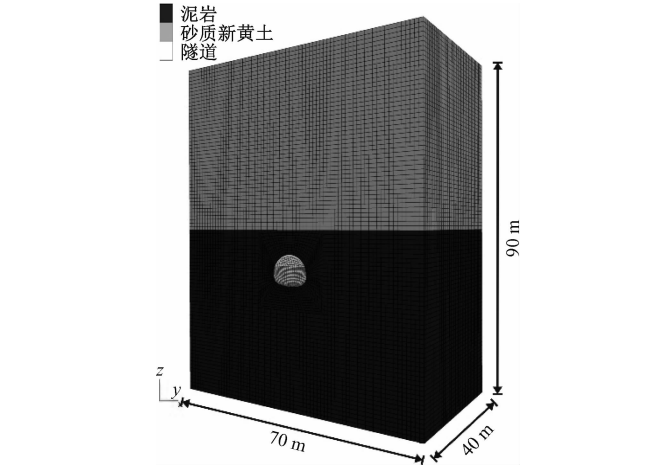


图 1 隧道模型
Fig. 1 Tunnel model

拱法、中隔壁法(图 2)等不同开挖方式下隧道围岩稳定性进行分析评价。

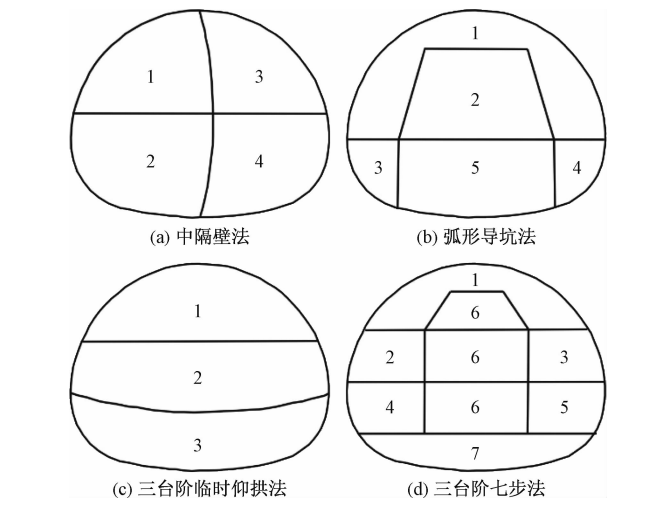


图 2 不同开挖方法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of different excavation methods

3 模拟结果分析

3.1 隧道强度折减曲线分析

隧道拱顶下沉是隧道监测的必测项目,同时也是围岩稳定性评价的关键控制变量。通过拱顶下沉的量测,可及时掌握围岩的变形状况,为衬砌施作时机的选择提供指导。

隧道不同开挖方法下强度折减曲线如图 3 所示。从图中可以看出各种开挖方法的位移曲线在折减系数较低时位移量变化不大,沉降曲线总体呈直线变化,表明围岩处于弹性变形阶段。随着折减系数的增加,围岩强度达到屈服极限,沉降曲线开始向上弯曲,表明围

岩大范围破坏,岩体承载能力下降直至失稳,拱顶沉降量呈指数型增加。通过分阶段直线拟合沉降曲线,可以得到位移发生突变的点,其对应横坐标即为隧道围岩稳定的稳定性系数。

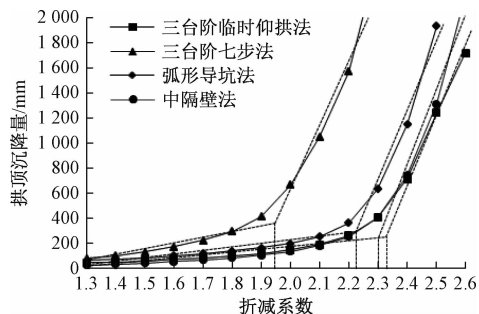


图3 不同开挖方法稳定性系数对比

Fig. 3 Comparison of safety factors with different excavation methods

对比四种开挖方法的沉降曲线可以看出:其中三台阶七步法的沉降曲线最先出现拐点,为 1.94,且斜率较大,随着折减系数的增加,沉降量迅速增加,表明此法对岩体扰动较大且不利于岩体稳定。弧形导坑法在折减系数为 2.22 时出现拐点,由于相对三台阶七步法在开挖过程中围岩受到扰动的次数更少,在图中表现为斜率更低,沉降量更小。中隔壁法和三台阶临时仰拱法相差不大,拐点出现较晚,折减系数分别为 2.3 和 2.33。相对于前两种工法,台阶仰拱法和中隔壁法都增设有临时钢结构支护围岩,提高围岩的支护强度。但由于二者稳定性系数相近,需进一步分析塑性区面积进行最适宜开挖方法的甄别。

3.2 隧道围岩塑性状态分析

图 4 为不同方法开挖后不同部位围岩塑性区面积比柱形图。从图中可以看出中隔壁法和台阶仰拱法总体上塑性区面积比都较低,约为 20%~30%。而弧形导坑法和三台阶七步法塑性区面积比则较高,均达到 50%以上,三台阶七步法在隧道上部比值达到了 95.9%。说明采用中隔壁法和台阶仰拱法开挖隧道时围岩稳定性要优于弧形导坑法和三台阶七步法。由于稳定性系数相近,中隔壁法与台阶仰拱法的塑性区面积比比值相差不大。但在对围岩稳定性影响较大的隧道上部和左侧,三台阶临时仰拱法较好,在隧道右侧为中隔壁法较好。

综合对比四种开挖方法的稳定性系数和塑性区特征可以发现:开挖过程中的扰动次数越多,稳定性系数越小,塑性区面积比越大;支护闭合的越快,稳定性系数越大,塑性区面积比越小。表明在软弱泥

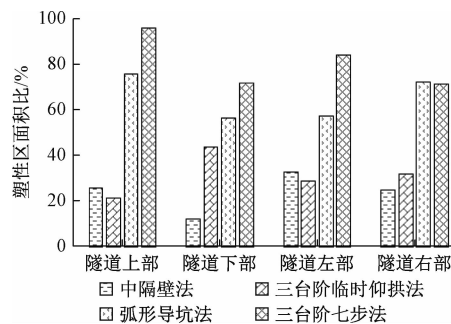


图4 隧道塑性区对比图

Fig. 4 Comparison graph of tunnel plastic zones

岩隧道中,围岩强度低,难以自稳,开挖扰动对围岩的沉降量影响较大,因此初次支护闭合越及时,隧道的稳定性越好。综上所述,三台阶临时仰拱法折减系数较大,拱顶塑性区面积比较小,在开挖隧道时对围岩扰动次数少,且支护闭合速度快,因此稳定性优于其他开挖方法。

4 围岩稳定性分析

4.1 隧道围岩位移分析

图 5 为拱顶上部不同距离的沉降位移曲线图。

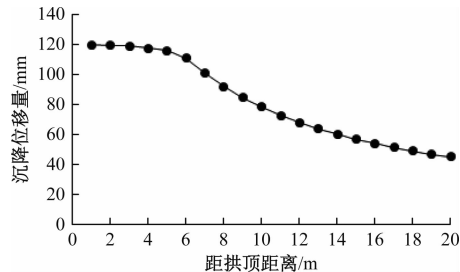


图5 拱顶沉降量变化图

Fig. 5 Settlement change chart of the vault

从图中可以看出在距拱顶 6~20 m 范围内,沉降位移量随着距离减小逐渐增大,曲线斜率逐渐增加。在距拱顶 5 m 处位移曲线出现拐点。在 1~5 m 范围内,沉降量增加缓慢且趋于稳定。可以看出从黄土层到泥岩层界面处(即 5 m 处),由于岩体强度的增大,导致位移曲线斜率突然变小。

在隧道断面的各个部位中,位移量从大到小依次为拱顶、拱腰、仰拱、拱墙和拱脚(图 6)。其中位于隧道上部的拱顶和拱腰的位移量分别达到 112.1 mm 和 85.1 mm,表明围岩自重是造成上部围岩位移的主要原因。此外隧道仰拱处位移量为 41.6 mm,表明隧道下部由于自重荷载的消失,产生向上的位移,且变形量较大。在二次衬砌设计时应在拱顶、拱腰和仰拱处留

出足够的预留变形量,以防止拱顶沉降对二次衬砌造成破坏。

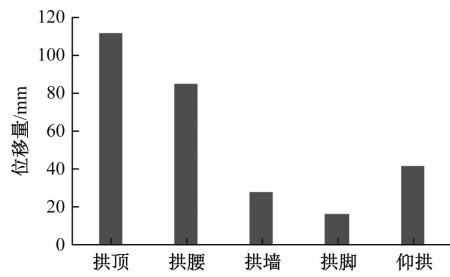


图 6 隧道不同部位的位移量图

Fig. 6 Displacement graph of different parts of the tunnel

4.2 隧道围岩应力分析

隧道一断面围岩最大主应力变化过程如图 7 所示。

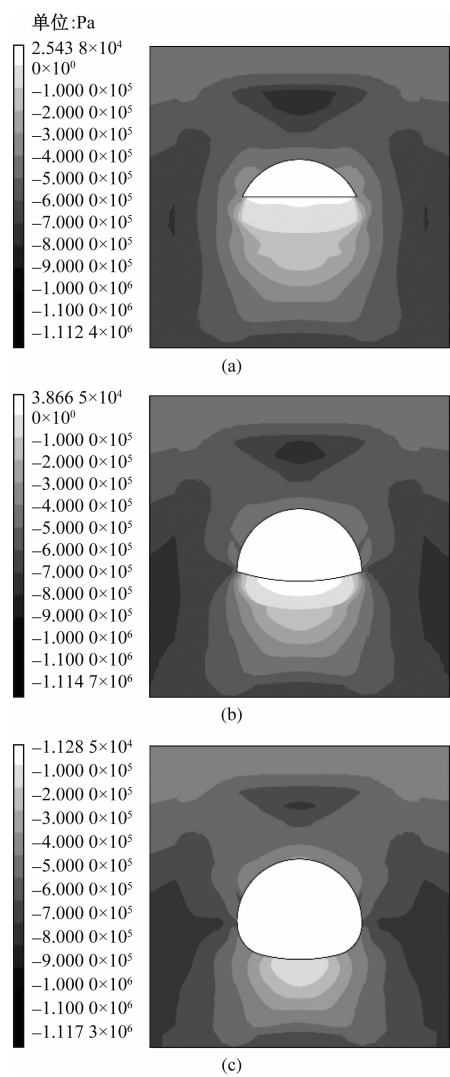


图 7 围岩最大主应力变化过程图

Fig. 7 Process diagram showing the maximum principal stress change of the surrounding rock

图中可以看到在开挖上台阶后拱顶上方出现应力集中区,两侧应力向台阶拐角集中。在开挖中台阶并施加临时仰拱后,由于支护闭合,拱顶上方应力集中区减小,仰拱两侧出现应力集中。在断面全部开挖后,初次支护完成,拱顶上方应力集中区几乎消失,但由于临时仰拱的拆除,导致失去拱墙两侧的支撑,两侧应力增大。

4.3 隧道围岩塑性状态分析

图 8 为隧道开挖过程中围岩塑性区随开挖步数的变化图。

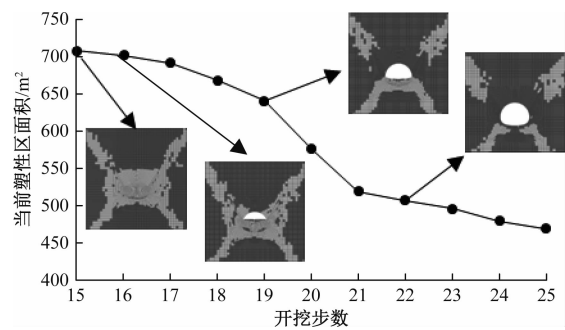


图 8 同一断面围岩塑性区变化特征

Fig. 8 Change characteristics of plastic zone at the section of surrounding rock

从图 8 中可以看出,隧道围岩当前塑性区的大小随着开挖和支护的进行会受到较大的影响。在开挖前,隧道掌子面由于受到扰动,产生塑性破坏区。由于未施加临时仰拱,在开挖上台阶并支护拱顶后,当前塑性区减小缓慢。在开挖中台阶后随着侧壁和临时仰拱的施加使支护提前闭合,围岩当前塑性区明显减小。在隧道断面完全开挖且初次支护完成后,围岩塑性区面积趋于稳定,临时仰拱施加后仰拱两侧和上部剪切塑性区消失,表明临时仰拱的施加对稳固围岩稳定效果较好。

5 结论

(1)通过强度折减法计算不同开挖方式下围岩的稳定性系数,可定量评价隧道围岩的稳定性。对稳定性系数相近的工法,进一步分析围岩塑性区,可更具体的确定不同部位的稳定性,以准确判定更加适宜的开挖方式,从而改进以往结果存在的偏差。

(2)在软弱泥岩隧道中,围岩强度低,自稳能力差。三台阶临时仰拱法施工时开挖扰动少,支护闭合快,且稳定性系数和塑性区面积比优于其他工法,是软弱泥岩隧道施工中较适宜的方法。

(3)采用三台阶临时仰拱法开挖后,拱顶、拱腰和

仰拱处位移量较大,因此在隧道施工时对位移较大的部位应及时加强支护。由于临时仰拱的拆除和初次支护的完成,围岩应力集中的位置从拱顶上方改变为临时仰拱两侧,应适当加大两边墙衬砌的厚度,以控制隧道支护衬砌压力;隧道开挖后应及时施加临时仰拱,使支护闭合,抑制拱顶塑性区的发展。

参考文献:

- [1] 毛燕飞. 基于岩土控制变形分析法的软弱围岩隧道开挖变形控制技术[D]. 西安:长安大学, 2015.
MAO Yanfei. Controlled deformation in rock and soils during flabbiness tunnelling excavation based on ADECO-RS[D]. Xi'an:Chang'an University, 2015.
- [2] 杨小明,张鸿,张理平,等. 断层特征与掘进方法对隧道围岩稳定性影响分析[J]. 南昌工程学院学报,2015(6):5-9.
YANG Xiaoming, ZHANG Hong, ZHANG Liping, et al. Analysis of influence of fault characteristics and tunnel excavation method on stability of surrounding rock [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2015(6):5-9.
- [3] 王金明,杨小礼. 浅埋暗挖地铁隧道不同工法对地表沉降的影响[J]. 石河子大学学报(自科版), 2008, 26(4):499-503.
WANG Jinming, YANG Xiaoli. Influence of different construction methods on ground settlement for shallow metro tunnel by excavation [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2008, 26(4):499-503.
- [4] 杨红军,廖树忠,方建勤,等. 隧道埋深及施工方法对于二衬支护时机的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2010(5):113-118+123.
YANG Hongjun, LIAO Shuzhong, FANG Jianqin, et al. Influence of tunnel burial depth and excavation method on second lining support time [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010(5):113-118+123.
- [5] 汪波,张胜,何川. 偏压状态下新建隧道下穿既有构筑物合理施工方法研究[J]. 铁道标准设计, 2010(12):70-75.
WANG Bo, ZHANG Sheng, HE Chuan. Research on reasonable construction method of newly built tunnel in existing biased state [J]. Railway Standard Design, 2010(12):70-75.
- [6] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7):1297-1316.
ZHENG Yingren. Development and application of numerical limit analysis for geological materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7):1297-1316.
- [7] 郑颖人,邱陈瑜,张红,等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10):1968-1980.
ZHENG Yingren, QIU Chenyu, ZHANG Hong, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10):1968-1980.
- [8] 杨臻,郑颖人,张红,等. 岩质隧洞围岩稳定性分析与强度参数的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2):283-290.
YANG Zhen, ZHENG Yingren, ZHANG Hong, et al. Analysis on stability for the surrounding rock of tunnel and exploring the strength parameters [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2):283-290.
- [9] 张黎明,郑颖人,王在泉,等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1):97-101.
ZHANG Liming, ZHENG Yingren, WANG Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1):97-101.
- [10] 侯瑞彬,申玉生,陈明奎. 基于强度折减法的浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性分析[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(4):55-60.
HOU Ruibin, SHEN Yusheng, CHEN Mingkui. Analysis on surrounding rock stability of shallowly-buried eccentrically-loaded tunnels with small interval based on strength reduction method [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(4):55-60.
- [11] 邓建林. 基于强度折减法的软硬不均地层隧道开挖方法转换时机研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(6):676-682.
DENG Jianlin. Study of excavation method conversion time in heterogeneous ground based on strength reduction method [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(6):676-682.
- [12] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定性系数[J]. 岩土工程学报, 2002(3):343-346.
ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et

- al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002(3):343-346.
- [13] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. ISRM News Journal, 1994, 2(2):4-16.
- [14] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. The International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8):1165-1186.
- [15] 卢书强, 许模. 基于 GSI 系统的岩体变形模量取值及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2736-2742.
- LU Shuqiang, XU Mo. Determination and application of modulus of deformation of rock masses based on GSI system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1):2736-2742.
- [16] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses; the case of the Athens Schist Formation[J]. Bull. Engg. Geol. Env., 1998, 57(2):151-160.
- [17] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [C]// Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada, 2002:267-273.
- [18] 苏永华, 何新亮, 罗正东. 基于强度折减法的隧道围岩稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1):48-53.
- SU Yonghua, HE Xinliang, LUO Zhengdong. Research on the stability of surrounding rocks based on the strength reduction method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1):48-53.
- [19] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.

(上接第 58 页)

- [16] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [C]. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC): Mining Innovation and Technology. Toronto, Canada; [s. n.], 2002: 267-273.
- [17] EBERHARDT E. The Hoek-Brown failure criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(6): 981-988.
- [18] 刘宁, 张春生, 褚卫江, 等. 深埋大理岩力学特性对岩爆发生条件的影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2638-2643.
- LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHU Weijiang, et al. Influence of mechanical characteristics of deep-buried marble on rock burst occurrence conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2638-2643.
- [19] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945-1963.
- ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1945-1963.
- [20] MARINOS P, HOEK E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation[C]. Proceedings of the 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne. Australia; [s. n.], November 19-24, 2000: 1422-1442.