

文章编号: 1674—8247(2019)06—0015—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.003

## 向家湾隧道进口段围岩分级及破坏模式研究

徐凡献<sup>1</sup> 代鸿明<sup>2</sup> 马留闯<sup>1</sup> 王 峰<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道股份有限公司, 郑州 450000; 2. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100000)

**摘 要:**为分析郑万高速铁路向家湾隧道围岩稳定性,根据隧道施工过程中编录的围岩地质信息和测定的岩石强度参数,应用铁路隧道设计规范的围岩分级 BQ 法对隧道进口段围岩进行了亚分级,并使用 Geostudio 有限元软件对围岩破坏模式进行了数值模拟。结果表明,拱顶拉应力集中明显,可能出现塌落。实际施工中,拱顶围岩局部塌落与数值模拟结果一致,验证了模拟结果的合理性。基于以上分析,考虑地层产状和结构面特征,提出围岩支护措施建议。本研究对类似隧道安全施工具有重要的实践指导意义。

**关键词:**高速铁路;隧道;围岩;分级;破坏模式;支护

**中图分类号:**U452.1+1 **文献标志码:**A

## Study on Classification and Failure Mode of Surrounding Rock in the Entrance Section of Xiangjiawan Tunnel

XU Fanxian<sup>1</sup> DAI Hongming<sup>2</sup> MA Liuchuang<sup>1</sup> WANG Feng<sup>1</sup>

(1. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;  
2. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100000, China)

**Abstract:** In order to systematically analyze the stability of surrounding rock in Xiangjiawan tunnel of Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway, on the basis of geological information of surrounding rock recorded parameter measured during tunnel, the BQ method as specified in Code for Design of Railway Tunnel is applied to implement sub-level classification for surrounding rock of the tunnel entrance section. And the failure mode of the surrounding rock is simulated numerically by a finite element software-Geostudio. The results show that the rock masses at the vault may collapse induced by tensile stress concentration. In the actual construction process, the partial collapses of the surrounding rock at the vault is consistent with the numerical simulation results, which verifies the rationality of the results. Based on the above analyses, considering the attitude of stratum and the characteristics of the structural planes, the support measures suggestions for the surrounding rock are proposed. This study has important practical guiding significance for the safety construction of similar tunnels.

**Key words:** high-speed railway; tunnel; surrounding rock; classification; failure mode; support measures

我国是一个多山的国家,69%的国土面积为丘陵、大深埋山岭隧道占比的不断提高,隧道施工面对的工程地质环境条件越来越复杂,对隧道工程设计和施工

收稿日期:2019-03-06

作者简介:徐凡献(1980-),男,高级工程师。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41402266);四川省交通厅科技项目(2015A1-3-01);国家重点研发计划(2018YFC1505404)

引文格式:徐凡献,代鸿明,马留闯,等. 向家湾隧道进口段围岩分级及破坏模式研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):15-20.

XU Fanxian, DAI Hongming, MA Liuchuang, et al. Study on Classification and Failure Mode of Surrounding Rock in the Entrance Section of Xiangjiawan Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 15-20.

的要求也愈来愈高。当长大山岭隧道穿越软弱破碎岩层时,如果施工方法处理不当,会引起围岩大变形,不仅提高工程成本,还会对施工人员的安全构成威胁。由于对隧道软弱围岩的变形机制与规律认识不足,采取的控制技术方法缺乏针对性,软弱围岩大变形引发拱顶离层破坏、拱顶弯折内鼓乃至隧道大面积垮塌的现象屡有发生。于学馥等人将围岩的变形破坏分为局部落石破坏、拉断破坏、重剪破坏、剪切破坏与复合破坏型、岩爆破型及潮解膨胀破坏型6种类型<sup>[1]</sup>。蒋金泉等人进行了隧道围岩灾变失稳效应<sup>[2]</sup>。向天兵等人通过大型洞室破坏模式,归纳了围岩破坏模式的分类方法<sup>[3]</sup>。王明年等人通过对土质隧道破坏模式的分析将土质围岩破坏模式分为4种形式<sup>[4]</sup>。黄锋等人利用模型试验方法研究了特定应力场下无支护隧道围岩的渐进破坏机理<sup>[5]</sup>。此外,张倬元等人系统的阐述了围岩的变形机理并总结了其破坏模式<sup>[6]</sup>。

隧道围岩等级的划分是围岩自稳能力的综合反映,主要基于围岩自稳跨度的评价。何发亮<sup>[7]</sup>等人我们详细介绍了铁路隧道围岩分级的发展历程。早在1946年,美国学者太沙基便提出以围岩压力值为指标的围岩分级法<sup>[8]</sup>。1958年Lauffer提出了基于围岩稳定时间的分级方法<sup>[9]</sup>。1960年Deere等人又提出了基于岩石质量指标RQD的分级方法<sup>[10]</sup>。1973年Bieniawski提出了节理岩体的地质力学分级法(RMR法),综合考虑了结构面完整性、岩石强度和地下水等多种因素<sup>[11]</sup>。1974年Barton提出了岩石质量指标分级法(Q法)<sup>[12]</sup>。1973年中铁二院在前人的基础上,系统性地提出了考虑工程地质条件、岩石的单轴抗压强度、完整状态和稳定状态等因素的隧道围岩分级法。同年,中铁四院和铁科院西南研究所提出了“围岩类别与弹性波速度”关系的分级方法。1995年水利部综合国内外研究成果,制定颁布了GB 50218-94《工程岩体分级标准》<sup>[13]</sup>,使用BQ法对岩体质量进行级别划分。这种分级法以结构面的组数、间距、状态,风化程度,岩石强度,地下水等因素为指标,并且将工程因素中的结构面方位以及施工方法引入分级法,不但提高了围岩分级的准确性,而且使得分级更加方便和实用。后来,交通系统修正完善了BQ法,并写入TB 10003-2016《铁路隧道设计规范》<sup>[14]</sup>。

我国铁路隧道设计规范使用BQ法将围岩划分为6个等级。根据大量的实际工程资料显示,由于地质环境条件的复杂多变,勘察精细化程度不高,围岩的变形机理及失稳模式较为复杂,加上BQ法修正系数取

值存在一定模糊性,造成施工设计偏保守等<sup>[15-16]</sup>。因此,隧道施工过程中,根据揭露的地质情况进行围岩亚分级,及时进行设计变更,可缩短施工工期,降低成本。本文以郑(州)-万(州)高速铁路向家湾隧道为研究对象,根据岩体结构面特征、地层产状与掌子面组合关系,采用BQ法对隧道进口段围岩分级进行了校核和亚分级,并使用Geostudio有限元软件分析了隧道开挖过程中围岩稳定性和破坏模式,从而提出围岩支护措施建议。

## 1 向家湾隧道进口围岩分级

### 1.1 隧址区工程地质条件概述

郑万高速铁路向家湾隧道位于湖北省宜昌市兴山县南阳镇境内,隧道全长4 663.24 m,走向240°,最大埋深约1 025 m,属于深埋长大山岭隧道。隧道设计内轮廓为拱形(5心圆),隧道开挖高度12.23 m,跨度14.70 m,除进口试验段进行了全断面开挖,全线采用上下台阶开挖。

隧址区属秦岭大巴山体系,为岩溶剥蚀中山地貌。区内地势北高南低,地势起伏较大,最高山峰标高约1 606 m,最低点为白沙河河谷,标高约148 m,地形高差约1 458 m。峰谷纵横,溪沟由北向南深切。构造上位于新华夏系一级隆起带的第三隆起带,以及淮阳山字型西翼反射弧和“长江中下游区域东西向构造带”相汇处。

隧道进口段为D2K 581+810~D2K 582+110。地层岩性为志留系下统罗惹坪组( $S_1lr$ )页岩夹砂岩。页岩,灰绿色,层状构造,泥质胶结,岩质极软,易风化剥落,具遇水软化崩解、失水收缩开裂等特性。砂岩,中~细粒结构,泥质胶结,中厚~厚层状,质稍硬,层厚1~3 m。由于岩层强风化带较薄(1~6 m),隧道进口6 m之后岩体均为弱风化,岩层中发育两组长大节理(J1和J2),受节理切割,岩体较破碎,完整性较差,围岩评定为IV级软岩。J1节理产状 $80^\circ \sim 100^\circ \angle 60^\circ \sim 75^\circ$ ,J2节理产状 $345^\circ \sim 5^\circ \angle 55^\circ \sim 70^\circ$ ,两组节理呈“X”形,节理间距0.2~0.4 m,节理面紧闭干燥,无渗水。由此可见,影响围岩稳定性的关键因素为破碎岩体的发育规模和结构面特征。根据结构面交切关系,赤平投影,如图1和表1所示。J1-L、J1-J2和J1-C3组交线切割形成的块体有可能沿J1-J2交线从掌子面朝洞内塌落,J1-J2、J1-C和L-C3组交线切割形成的块体有可能沿J1-C交线从掌子面朝洞内塌落。此外,J1-J2、J1-C和J2-C3组交线切割形成的块体有可能沿

J1-J2 交线从洞顶坠落。

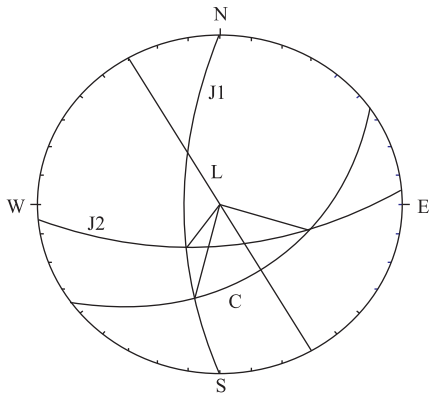


图1 隧道进口段赤平投影(上半球投影)

表1 隧道进口段结构面交切关系

编号	不连续面名称	倾向	倾角	组合交棱线	倾向	倾角
C	层面	325°	42°	C-J1	14°	31°
				C-J2	287°	35°
J1	节理1	90°	68°	J1-J2	35°	55°
				J1-L	150°	51°
J2	节理2	355°	62°	J2-L	330°	60°
L	掌子面	60°	90°	L-C	330°	42°

1.2 向家湾隧道进口段围岩分级

BQ法主要将岩石饱和单轴抗压强度,岩体完整性系数,结构面产状,地应力和地下水条件作为评价指标,具体如式(1)所示。

BQ = 100 + 3R<sub>c</sub> + 250K<sub>v</sub> (1)

式中:R<sub>c</sub>——岩块饱和单轴抗压强度;

K<sub>v</sub>——岩体的完整性系数。

当围岩处于高地应力区或有不利于岩体稳定的软弱结构面和地下水时,岩体BQ值应进行修正,修正值[BQ]按式(2)计算:

[BQ] = BQ - 100[K<sub>1</sub> + K<sub>2</sub> + K<sub>3</sub>] (2)

式中:K<sub>1</sub>——地下水影响修正系数;

K<sub>2</sub>——主要软弱面产状影响修正系数;

K<sub>3</sub>——初始地应力影响修正系数。3个系数均可查表得到。

岩体级别按总评分值确定。BQ法优点体现在:

(1)采用了相互独立的2个主要评价指标,其他因素作为修正因素,进而建立了平行的定性与定量评价体系,在实际应用中能够相互验证;(2)其体系严谨、操作性强、灵活性高,同时与RMR等方法相关性良好。主要缺点表现为:(1)当隧道断面增大超过某一临界值,需要进行必要的修正。根据王春雷<sup>[17]</sup>的研究,隧道断面面积较小时(<80 m<sup>2</sup>),国标BQ法与实际围岩符合率最好,但当断面面积大于120 m<sup>2</sup>时,按BQ法得到的围岩等级比真实的围岩等级高;(2)主要软弱面产状影响修正系数K<sub>2</sub>取值范围过宽,对工程师经验要求较高;(3)初始地应力影响修正系数K<sub>3</sub>没有考虑岩爆烈度对围岩稳定的影响,只是简单地区分高地应力和极高地应力2种情况,取值也不易确定<sup>[15]</sup>。实际工程中,应当依据不同工程需要,重点关注评价指标取值的合理性。例如,针对岩爆隧道,可考虑结构面倾向和倾角对围岩稳定的影响,优化软弱结构面影响修正系数K<sub>2</sub>;考虑岩爆烈度影响,优化初始应力状态影响修正系数K<sub>3</sub>等<sup>[18]</sup>。

使用BQ法对隧道进口段围岩分级进行校核和亚分级,结果如表2所示。其中,岩体的饱和单轴抗压强度R<sub>c</sub>和完整性系数K<sub>v</sub>通过饱水单轴抗压试验、点荷载试验和波速测量确定。考虑施工过程中围岩本无水渗漏,根据规范,K<sub>1</sub>取0.1。控制性结构面主要为岩层面,与洞轴线夹角α为85°大于60°,倾角β为42°。当层面走向与洞轴线大角度相交时,掘进方向也会対围岩稳定性产生影响。参考RSR法<sup>[19]</sup>和RMR法<sup>[11]</sup>,当结构面倾向与掘进方向同向,如图2所示,倾角越大,围岩稳定性越好,K<sub>2</sub>可取较小值。本文K<sub>2</sub>取0.2。向家湾隧道隧址区垂直隧道洞身的最大主应力为4.95 MPa,砂页岩的单轴饱和抗压强度平均值为32.8 MPa,R<sub>c</sub>/σ<sub>max</sub>为6.63,为高应力,本文K<sub>3</sub>取0.5。由表2可知,向家湾进口段D2K 581+810.00~D2K 581+834.60,D2K 581+841.00~D2K 581+963.00,D2K 581+973.00~D2K 582+013.00等区段围岩为IV<sub>1</sub>级,D2K 581+834.60~D2K 581+841.00,D2K 581+963.00~D2K 581+973.00围

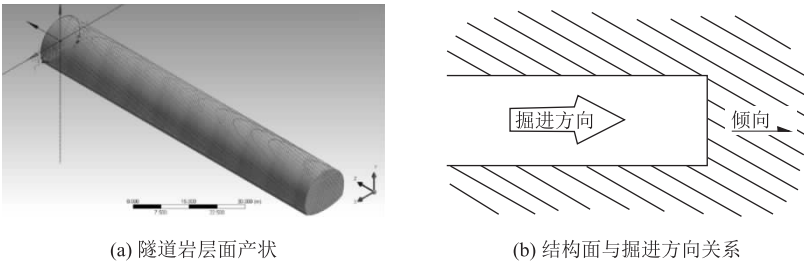


图2 向家湾隧道地质模型及掘进方向

表2 隧道进口段围岩BQ法分级

开始里程	结束里程	$R_c/\text{MPa}$	$K_v$	BQ	$K_1$	$K_2$	$K_3$	[BQ]	亚分级	原分级
D2K 581 + 810.00	D2K 581 + 834.60	30.4 ~ 33.6	0.8 ~ 0.88	390.8 ~ 408.7	0.1	0.2	0.5	310.8 ~ 328.7	IV <sub>1</sub>	V
D2K 581 + 834.60	D2K 581 + 841.00	31.6	0.8	384.8	0.1	0.2	0.5	304.8	IV <sub>2</sub>	V
D2K 581 + 841.00	D2K 581 + 873.00	31.2 ~ 33.4	0.8 ~ 0.83	390.2 ~ 393.5	0.1	0.2	0.5	310.2 ~ 313.5	IV <sub>1</sub>	V
D2K 581 + 873.00	D2K 581 + 963.00	30.4 ~ 38.2	0.8 ~ 0.88	390.8 ~ 417.1	0.1	0.2	0.5	310.8 ~ 337.1	IV <sub>1</sub>	IV
D2K 581 + 963.00	D2K 581 + 973.00	31.6	0.8	384.8	0.1	0.2	0.5	304.8	IV <sub>2</sub>	IV
D2K 581 + 973.00	D2K 582 + 013.00	31.2 ~ 33.4	0.8 ~ 0.83	390.2 ~ 393.5	0.1	0.2	0.5	310.2 ~ 313.5	IV <sub>1</sub>	IV

岩为 IV<sub>2</sub> 级。其中, D2K 581 + 810.00 ~ D2K 581 + 873.00 围岩比设计单位提供的 V 级高了1 级,其余里程与设计单位围岩分级一致。

2 向家湾隧道开挖数值模拟

2.1 模型建立

本项研究采用有限元软件 GeoStudio 的SIGMA/W 模块,模拟无地震和无渗水条件下,向家湾隧道进口段围岩开挖后的应力应变状态。根据隧道的地质结构以及埋深,建立向家湾隧道地质模型。

根据隧道 150 m 的埋深,得到竖向应力为 3.6 MPa。通过式(3) 计算得到水平应力为1.5 MPa,等于竖向应力的侧向分量(3.6 × 0.33 = 1.2 MPa)与水平构造应力(构造应力 0.3 MPa<sup>[20]</sup>)之和。同时监测拱顶、拱肩、墙底和仰拱中部的应力、应变和位移。砂页岩的物理力学参数如表 3 所示。

$$\sigma_3 = K_x \times \sigma_1 + \sigma_x = \frac{\mu}{1 - \mu} \times \gamma h + \sigma_x \tag{3}$$

- 式中: $\sigma_1$ ——围岩的竖向应力;  
 $\sigma_3$ ——围岩的水平向应力;  
 $\gamma$ ——上覆岩体的平均重度;  
 $h$ ——隧道埋深;  
 $K_x$ ——侧压力系数;  
 $\mu$ ——泊松比;  
 $\sigma_x$ ——区域构造应力。

表3 隧道围岩的物理力学参数表

地层年代	岩土名称	风化状态	天然密度/(kg/m <sup>3</sup> )	天然快剪		泊松比	弹性模量/GPa
				黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
S <sub>1</sub> lr	页岩夹砂岩	弱风化	2 400	150	50	0.25	22.5

2.2 计算结果与分析

隧道未挖前,围岩受到上覆岩土体自重应力和水平向构造应力作用,应力和应变分布均匀,拱顶处 Y 向应力为 3.8 MPa,Y 向应变为 0.14%。隧道开挖后,围岩的应力变化剧烈,X 向应力在拱肩和拱脚出现应力集中,如图 3 所示。Y 向应力在拱顶和仰拱中部出

现应力集中,且应力由正变为负,表现为受拉状态,如图 4 所示。拱肩及边墙中部 X 向应变增大到 0.18%,如图 5 所示,拱顶 Y 向应变增大到 0.5%,如图 6 所示。

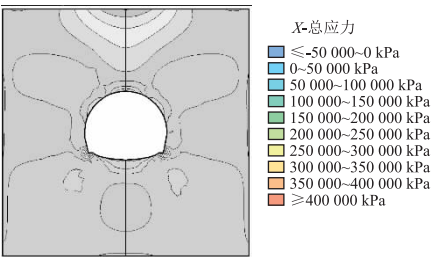


图3 开挖后 X 向应力云图

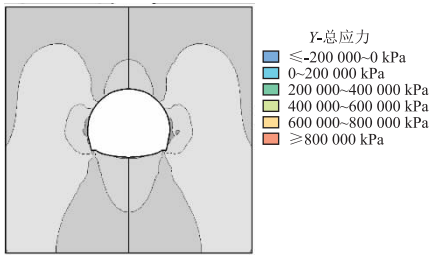


图4 开挖后 Y 向应力云图

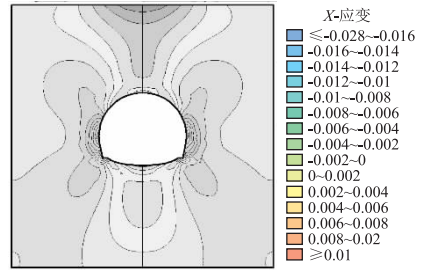


图5 开挖后 X 向应变云图

边墙 X 向位移达到 2 ~ 4 cm,如图 7 所示,仰拱中部 Y 向位移将达到 5 cm,拱顶 Y 向位移将达到 75 ~ 80 cm,如图 8 所示,说明受高地应力作用,拱顶和底部可能出现垮塌和隆起破坏。隧道实际施工过程中,即使使用了管棚超前支护,仍出现拱顶局部掉块现象,因此数值模拟结果可信。

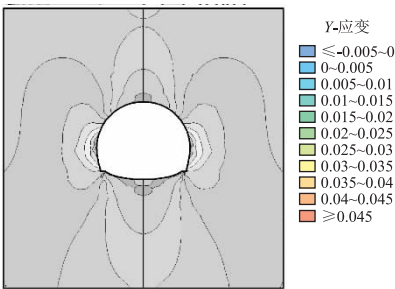


图6 开挖后Y向应变云图

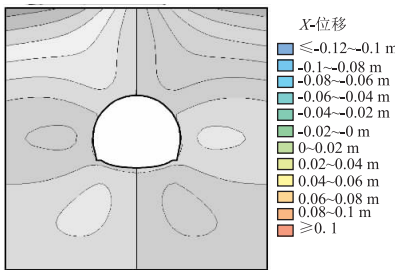


图7 开挖后X向位移云图

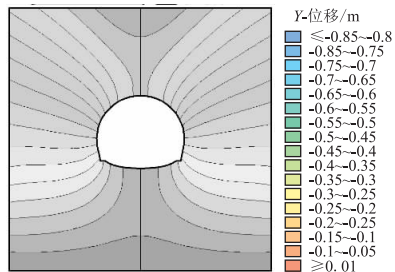


图8 开挖后Y向位移云图

由监测点应变和位移信息,如表4所示,隧道边墙Y向应变大于拱顶和洞底,但边墙Y向位移小于拱顶

和洞底,说明边墙岩体在破坏前能够储存较大应变能,同时不会出现显著变形。

表4 开挖后监测点应力,应变和位移信息表

监测点	X-应变	Y-应变	X-Y剪应变	X-位移/m	Y-位移/m
1	0	0.005	0	0	-0.757
2	0.007	0.024	0.039	0.000 3	-0.601
3	0.002	0.020	-0.036	0.008	-0.233
4	0	0.005	0	0	0.05
5	0.002	0.020	0.036	-0.000 3	-0.233
6	0.007	0.024	0.039	-0.008	-0.601

据隧道开挖后的现场情况,拱顶处发生弯折沉降变形,且速率较大。随着沉降量的加大,拱顶出现岩层弯折破坏,岩块在自重的作用下掉落,使得拱顶形态塌落成四边形。因此本文数值模拟结果与隧道实际开挖后拱顶塌落现象(见表5)较为一致。

3 结论及建议

(1)郑万高速铁路向家湾隧道进口段围岩为页岩夹砂岩,节理发育,岩体破碎,完整性较差。根据结构面产状和掘进方向的关系,以及地应力大小,合理选取修正系数 $K_2$ 和 $K_3$ ,使用BQ法得出隧道进口段围岩级别为 $IV_1$ 和 $IV_2$ 级,局部地段比原设计单位围岩等级提高一级。

(2)通过岩体结构面的赤平投影分析,J1-L、J1-J2和J1-C 3组交线切割形成的块体有可能沿J1-J2交线从掌子面朝洞内塌落,J1-J2、J1-C和L-C 3组交线切割形成的块体有可能沿J1-C交线从掌子面朝洞内塌落,J1-J2、J1-C和J2-C 3组交线切割形成的块体有可能沿J1-J2交线从洞顶坠落。

表5 隧道开挖软弱围岩变形破坏情况

序号	里程	岩性	破坏部位	破坏面形状	破坏面积/m <sup>2</sup>	塌落方量/m <sup>3</sup>	破坏形式
1	D2K 582 + 289.5	薄层砂质页岩	拱顶	平行四边形	6	4.2	层状崩落
2	D2K 582 + 333.0	薄层砂质页岩	拱顶	三角形	10	6	块状崩落
3	D2K 582 + 365.0	薄层砂质页岩	拱顶	平行四边形	9	5.4	层状崩落
4	D2K 582 + 374.0	薄层质页岩	拱顶	平行四边形	5	3	层状崩落
5	D2K 582 + 392.0	薄层砂质页岩	拱顶	近圆形	6	1.8	层状崩落
6	D2K 582 + 411.5	薄层砂页岩互层	拱顶	水平	7	10	层状崩落

(3)通过有限元数值模拟分析,向家湾隧道开挖会引起拱顶拉应力集中和洞底压应力集中,拱顶和洞底将对于边墙更容易破坏。尤其是当垂直节理发育时,拱顶张拉裂缝易沿垂直节理发展,使被裂缝切割的岩体在自重和开挖卸荷双重作用下变得不稳定,出现拱顶掉块现象。

(4)对于 $IV_1$ 和 $IV_2$ 级围岩隧道开挖,建议掌子面

超前加固,微台阶法开挖和初期支护机械化施工,合理选择并加强系统锚杆,并应开展信息化技术的综合预测预报。

参考文献:

[1] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.



- YU Xuefu, ZHENG Yingren, LIU Huaiheng, et al. Stability Analysis of Surrounding Rock Mass in Underground Engineering [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1983.
- [2] 蒋金泉, 曲华, 刘传孝. 巷道围岩弱结构灾变失稳与破坏区域形态的奇异性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3373 – 3379.
- JIANG Jinquan, QU Hua, LIU Chuanxiao. Research on Failure of Soft Structure and Singularity of Failure Zone of Roadway Surrounding Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3373 – 3379.
- [3] 向天兵, 冯夏庭, 江权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871 – 883.
- XIANG Tianbing, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Failure Mode Dynamic Recognition and Control for Surrounding Rock of Large-scale Cavern Group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 871 – 883.
- [4] 王明年, 陈炜韬, 张磊, 等. 土质围岩开挖破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2479 – 2483.
- WANG Mingnian, CHEN Weitao, ZHANG Lei, et al. Study of Failure Modes of Soil Surrounding Rock in Excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2479 – 2483.
- [5] 黄锋, 朱合华, 徐前卫. 不同地应力场软岩隧道渐进破坏试验与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1412 – 1419.
- HUANG Feng, ZHU Hehua, XU Qianwei. The Test and Analysis of Progressive Failure for Soft-weak Surrounding Rock Mass Tunnel in Different Ground Stress Fields [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1412 – 1419.
- [6] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Principles of Engineering Geology Analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [7] 何发亮, 王石春. 铁路隧道围岩分级方法研究及发展[J]. 铁道工程学报, 2005, 22(S1): 392 – 397.
- HE Faliang, WANG Shichun. Research and Development on the Method of Rockmasses Classification in Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(S1): 392 – 397.
- [8] Terzaghi K. Rock Defects and Loads on Tunnel Supports [J]. Rock Tunneling with Steel Supports. 1946:15 – 18.
- [9] Lauffer H. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau [J]. Geologie und Bauwesen, 1958, 24(1): 46 – 53.
- [10] D. U. Deere, D. W. Deere. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Rock Classification System for Engineering Purpose [C]// Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes, USA, 1988.
- [11] Nick Barton, R Lien, J Lunde. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support [J]. Rock Mechanics, 1974, 6(4): 189 – 236.
- [12] Nick Barton. Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterisation and Tunnel Design [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 185 – 216.
- [13] GB/T 50218 – 2014 工程岩体分级标准[S].
- GB/T 50218 – 2014 Standard for Engineering Classification of Rock Masses[S].
- [14] TB 10003 – 2016 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003 – 2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].
- [15] 牛文林, 李天斌. 岩爆隧道岩体质量评价的BQ法优化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 658 – 664.
- NIU Wenlin, LI Tianbin. Optimization of BQ Method Used in Rock Mass Quality Evaluation of Rockburst Tunnel [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(6): 658 – 664.
- [16] 吴圣智, 王明年, 刘大刚. 基于模糊概率理论岩质围岩基本分级细化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 45 – 51.
- WU Shengzhi, WANG Mingnian, LIU Dagang. Rocky Surrounding Sub-classification Based on Fuzzy Mathematics and Probability Method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 45 – 51.
- [17] 王春雷. 铁路客运专线大断面隧道围岩分级方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 54 – 58.
- WANG Chunlei. Research on the Method of Surrounding Rock Classification in Large Cross-section Tunnel for Passenger Dedicated Railway Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(2): 54 – 58.
- [18] WICKHA GE, HENRY R. Tiedemann. Ground Support Prediction Model (RSR Concept) [J]. Ground Support Prediction Model, 1974.
- [19] Wickham. Handbook on Mechanical Properties of Rocks [J]. Publication Trans Tech, 1978, 3(5): 32 – 37.
- [20] 李鸿博, 戴永浩, 宋继宏, 等. 峡口高地应力软岩隧道施工监测及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 496 – 501.
- LI Hongbo, DAI Yonghao, SONG Jihong, et al. Construction Monitoring for Xiakou Soft Rock Tunnel under High Geostress and Its Supporting Measures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 496 – 501.

(编辑:赵立红 白雪)