

虹梯关隧道围岩岩爆分析

刘丹丹¹, 王玉来², 王俊杰¹

(1. 黄河规划勘测有限公司地质勘探院, 河南 洛阳 471002; 2. 中交路桥技术有限公司, 北京 100029)

摘要:虹梯关隧道隧址围岩以硬质岩为主, 该隧道属特长深埋隧道, 其附近地质构造也十分发育, 工程地质条件复杂, 发生岩爆可能性很大。通过对岩爆影响因素的分析, 采用水压致裂法地应力测试, 经陶振宇判别法、切应力准则等应力判断方法, 认为虹梯关隧道隧址部分地段可能会发生轻微~中等岩爆。

关键词:特长深埋隧道; 岩爆; 地应力测试

中图分类号: U452.1⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2012)10-0072-04

Analysis on Rockburst of Hongtiguang Tunnel Surrounding Rock/LIU Dan-dan¹, WANG Yu-lai², WANG Jun-jie¹
(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Luoyang Henan 471002, China; 2. China Communication Road and Bridge Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The surrounding rock in Hongtiguang tunnel is mainly hard rock, which is an extra long and deep buried tunnel. The geological structure around the tunnel is developed very well, engineering geological conditions are complicated and there is great possibility for rockburst. Through the analysis on influencing factors of rockburst, hydrofracturing method, Taozhenyu method, shear stress criterion were used to test ground stress, the results show that there are occurrence possibilities of weak-moderate rockbursts in this tunnel.

Key words: extra long and deep buried tunnel; rockburst; ground stress test

0 引言

在高天然应力的弹脆性岩体中, 进行各种有目的的地下开挖工程时, 由于开挖卸荷及特殊的地质构造作用引起开挖周边岩体中应力高度集中, 当达到岩体所能承受的极限值时, 造成瞬间大量弹性应变能释放, 使围岩发生急剧变形破坏和碎石抛落, 并发生剧烈声响、震动和气浪冲击的现象称为岩爆。岩爆直接威胁着地下施工人员的安全, 是地下工程中一种危害最大的地质灾害。近几十年来, 随着我国隧道建设逐渐向着“长、大、深、群”方向发展, 岩爆对工程施工产生的影响和破坏已经越来越严重, 做好岩爆预测, 从而进行预防治理显得尤为重要。

1 隧道概况

虹梯关隧道位于山西省东南部, 该隧道设计为左右线分离式, 左线洞体全长 13122 m, 右线洞体全长 13098 m, 隧道最大埋深 640 m, 属深埋特长隧道。

1.1 工程地质条件

隧址区地貌类型总体属侵蚀低中山区。由于新生代以来构造运动的差异性及其出露岩性的不同, 使其地貌特征复杂多变。主要以溶蚀侵蚀作用为主,

山势险峻, 岩石坚硬, 陡崖发育, 形成峡谷。

拟建隧道穿越线围岩多为中厚层、厚层灰岩。山体海拔高程界于 820 ~ 1610 m 之间, 设计路面高程 894 ~ 1102 m 之间。

1.2 地质构造

隧址区岩层为单斜缓倾地层, 近褶皱、断裂带产状变化大。燕山运动在本项目区内活动强烈, 其构造变形主要表现为纵贯全区的由一系列褶皱、断裂构成的近南北构造岩浆岩带, 对隧道有影响的构造主要为虹梯关构造褶皱带, 该带北起轿顶山, 向南经虹梯关、乱石滩, 轴迹走向总体上呈 NNE5° ~ 10° 展布(详见图 1)。

该构造褶皱带主要影响奥陶系马家沟组地层, 由于该构造带与隧道轴线近垂直相交, 轴面近直立, 两翼产状舒缓, 构造活动轻微, 初步判断对隧道围岩分级影响不大。

2 地应力测试

2.1 地应力测试结果

为了解隧址区的应力状态及其沿深度方向的分布趋势, 对 XKZ127 号钻孔不同深度的完整段岩石进行了水压致裂法地应力测试。同时选择 4 个压裂

收稿日期: 2012-05-21

作者简介: 刘丹丹(1986-), 女(汉族), 河南洛阳人, 黄河规划勘测有限公司地质勘探院, 地质工程专业, 从事工程勘察工作, 河南省洛阳市瀍河区启明西路 34 号院, baoyai@163.com。

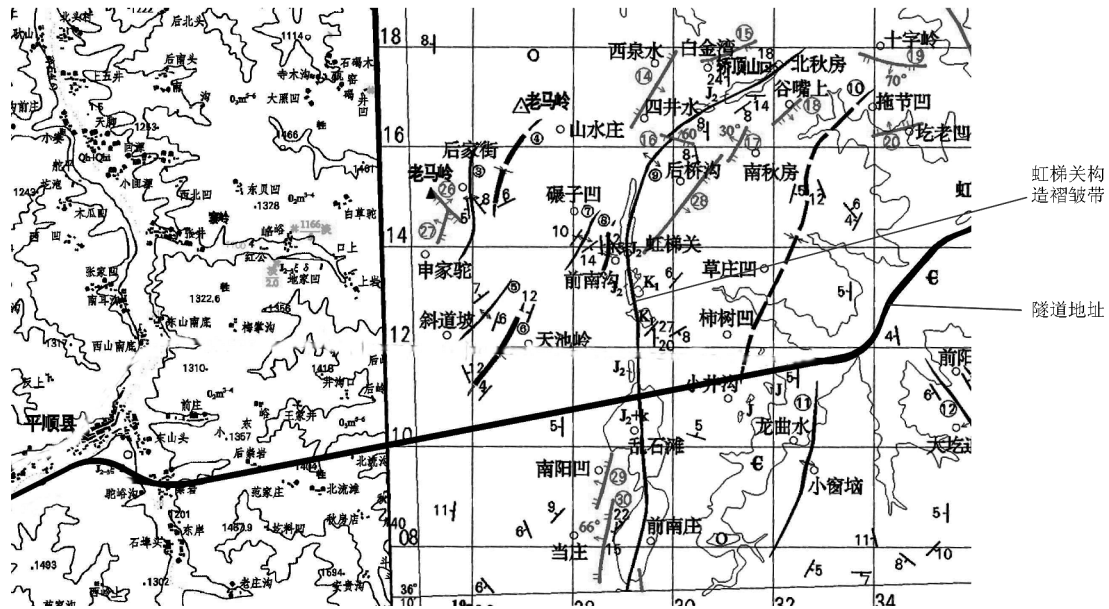


图1 隧址区构造纲要图

段采用定向印模器进行破裂缝方向的测定。测试结果见表1。

表1 XKZ127 钻孔水压致裂法地应力测试结果

序号	孔深/m	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_z /MPa	λ	σ_H 方位
1	286.0	10.8	6.4	7.7	1.4	
2	297.2	10.1	6.6	8.0	1.3	
3	310.9	10.3	6.4	8.4	1.2	
4	323.1	10.1	6.6	8.7	1.2	N30°W
5	335.0	10.8	6.5	9.0	1.2	
6	349.4	12.4	8.5	9.4	1.3	
7	361.7	10.0	6.1	9.8	1.0	
8	377.0	13.2	8.1	10.2	1.3	
9	390.9	13.0	7.5	10.6	1.2	
10	404.8	13.1	7.6	10.9	1.2	N13°W
11	418.5	12.0	7.7	11.3	1.1	
12	431.5	13.5	7.7	11.7	1.2	
13	447.6	15.4	8.7	12.1	1.3	N8°W
14	461.3	13.2	8.1	12.5	1.1	
15	480.4	15.2	9.2	13.0	1.2	N5°W

注:测试时孔内水位为350 m,破裂压力、重张压力及关闭压力为测点孔口压力值,岩石容重取为27 kN/m³。

2.2 测试成果分析

测试钻孔在测试深度范围内(286.0~480.4 m),最大水平主应力为10.0~15.2 MPa,最小水平主应力6.1~9.2 MPa,铅直应力为7.7~13.0 MPa。通过拟合获得水平主应力值随深度(H)变化关系见图2。

通过对测试范围内最大水平主应力(σ_H)和最小水平主应力(σ_h)结果的线性回归,可以得到体现主应力与埋深关系的方程式:

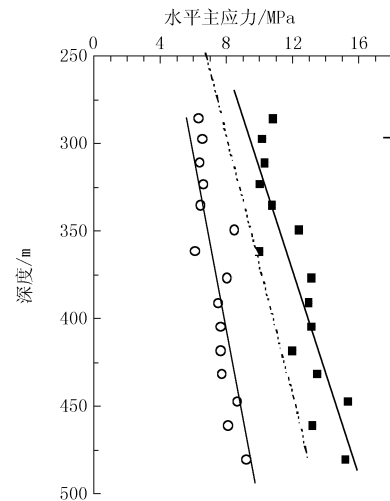


图2 XKZ127 孔主应力测值随深度的变化关系

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.025H + 2.69 \\ \sigma_h = 0.013H + 2.66 \end{cases} \quad (1)$$

由以上可以看出,在测试范围内,应力测值总体上随深度的增加而增大。根据测试,该钻孔的最大水平主应力方向在N30°W~N5°W之间。该钻孔布置于山坡,浅部最大水平主应力基本与山体走势平行,随埋深的增加向NS向偏转。最大水平主应力方向与隧道轴线方向成大角度(约89°)斜交,对隧道围岩的稳定性不利。

3 隧址区岩爆分析

根据国内外研究,普遍认为引起岩爆的因素很多,影响因素复杂,如地层岩性、应力状态、洞室埋深、围岩应力状态、开挖断面形状、开挖方法等等。

但众多因素中,地层岩性和地应力条件是产生岩爆的决定因素,只有具备了这2个条件,才有可能发生岩爆。下面就这2个因素对虹梯关隧道围岩岩爆进行分析判别。

3.1 地层岩性分析

隧道围岩主要岩性为灰岩、白云岩,属坚硬岩,围岩级别Ⅲ级及Ⅲ级以上。地质构造较好,节理不发育,同时无较大的断层水、裂隙水等。根据室内岩石试验成果资料,岩石单轴抗压强度较高,为61.5~89.8 MPa,平均强度80 MPa,具备岩爆可能。本次勘察在XKZ126钻孔隧道部位中取3组岩样进行了岩体弹性应变能系数试验,试验结果为79.1%~99.8%,弹性应变能系数 $\omega > 70%$,说明围岩脆性较高,隧道该部位产生岩爆的可能性较大。

3.2 地应力条件分析

测试区域内浅部岩体 R_c/σ_{max} 一般大于7,依照《工程岩体分级标准》(GB 50218-94),岩体应力等级为中等水平,而在隧道高程附近岩体 R_c/σ_{max} 在6附近,为高应力水平,产生岩爆可能性较大。本次岩爆地应力条件分析,采用强度理论中普遍应用的陶振宇判别法、Russenes判别法、Turchaninov判别法、切应力判别法等4种判别法进行综合评价。

3.2.1 围岩岩爆地应力判别法

3.2.1.1 陶振宇判别法

陶振宇判别法是把岩石的单轴抗压强度 R_c 与地应力(最大主应力) σ_1 的比值 $\alpha = R_c/\sigma_1$ 作为一个衡量岩爆的重要指标,在常用的巴顿判据的基础上,更加细化了岩爆发生的等级范围,提出了更能体现岩爆发生与否的标准。陶振宇判据指出在 $R_c/\sigma_1 > 14.5$,无岩爆; $5.5 < R_c/\sigma_1 < 14.5$,弱岩爆; $2.5 < R_c/\sigma_1 < 5.5$,中等岩爆; $R_c/\sigma_1 < 2.5$,强烈岩爆。

3.2.1.2 Russenes判别法

Russenes岩爆判别法是根据洞室的最大切向应力 σ_θ 与岩石点荷载强度 I_s 的关系,建立了岩爆烈度关系图。把点荷载强度 I_s 换算成岩石的单轴抗压强度 R_c ,并根据岩爆烈度关系图判别有无岩爆发生。其判别关系如下: $\sigma_\theta/R_c < 0.20$,无岩爆; $0.20 \leq \sigma_\theta/R_c < 0.30$,弱岩爆; $0.30 \leq \sigma_\theta/R_c < 0.55$,中岩爆; $\sigma_\theta/R_c \geq 0.55$,强岩爆。

3.2.1.3 Turchaninov判别法

Turchaninov岩爆判别法是根据科拉岛希宾地块的矿井建设经验,提出了岩爆活动性由洞室切向应力 σ_θ 和轴向应力 σ_L 之和与岩石单轴抗压强度 R_c 之比值确定: $(\sigma_\theta + \sigma_L)/R_c \leq 0.3$,无岩爆; $0.3 < (\sigma_\theta$

$+ \sigma_L)/R_c \leq 0.5$,有岩爆可能; $0.5 < (\sigma_\theta + \sigma_L)/R_c \leq 0.8$,肯定发生岩爆; $(\sigma_\theta + \sigma_L)/R_c > 0.8$,有严重岩爆。

3.2.1.4 切应力判别法

王元汉根据Russenes, Turchaninov, Hoek等人的经验判据,考虑洞室的最大切向应力和岩石的单轴抗压强度比的影响,提出了关于 σ_θ/R_c 的岩爆判据。当 $\sigma_\theta/R_c < 0.3$ 时,无岩爆;当 $0.3 < \sigma_\theta/R_c < 0.5$ 时,弱岩爆;当 $0.5 < \sigma_\theta/R_c < 0.7$ 时,中岩爆; $\sigma_\theta/R_c > 0.7$ 时,有强岩爆活动发生。

3.2.2 围岩岩爆判别结果分析

隧道最大测试深度约为480 m,小于隧道最大埋深610 m,因此,隧道围岩应力状态分析过程中需对隧道埋深较大、测试空白区的洞身段应力值采取一定的外延。由于测孔附近地层相对稳定,无明显构造,因此根据测试结果,建立隧道围岩的应力场量值式:

$$\begin{cases} \sigma_H = 1.2\sigma_z \\ \sigma_h = 0.8\sigma_z \\ \sigma_z = \gamma H \end{cases} \quad (2)$$

以上各种岩爆预测分析中,因为实际上地应力方向与隧道洞轴并不呈正交,因此根据实测的最大、最小水平主应力值及其方向以及垂直方向应力值,按下式计算隧道横断面上的应力分量:

$$\begin{cases} \sigma_H' = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\alpha \\ \sigma_L = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_H 、 σ_h ——水平最大、最小主应力; σ_H' 、 σ_L ——分别为垂直、平行隧道轴线的水平应力; α —— σ_H 与 σ_h 之间夹角。

隧道周边围岩切向应力以圆形洞近似估算,洞顶和边墙中点的应力状态为:

$$\begin{cases} (\sigma_\theta)_{顶} = 3\sigma_H' - \sigma_v \\ (\sigma_\theta)_{边} = 3\sigma_v - \sigma_H' \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(\sigma_\theta)_{顶}$ 、 $(\sigma_\theta)_{边}$ ——隧道洞顶和边墙中点的切向应力。

上述判别方法给出了已知应力状况和围岩力学参数推断围岩是否发生岩爆以及岩爆级别的标准。在本文下面的分析中,将式(2)代入式(3)经坐标转换后,代入式(4)求得隧道围岩的切向应力和轴向应力, R_c 取80 MPa然后求得各判别方法的结果如表2所示。

由于该隧道最大埋深为610m左右,综合以上

表 2 岩爆判别表

岩爆烈度	陶振宇判别法		Russenes 法		Turchaninov 法		切应力判别法	
	R_c/σ_h	H/m	σ_0/R_c	H/m	$(\sigma_0 + \sigma_L)/R_c$	H/m	σ_0/R_c	H/m
无岩爆	>14.5	<113	<0.2	<225	≤ 0.3	≤ 260	<0.3	390
弱岩爆	[14.5,5.5)	[113,474)	[0.2,0.3)	[225,350)	(0.3,0.5)	(260,420)	[0.3,0.5)	480
中岩爆	[5.5,2.5)	[474,1172)	[0.3,0.55)	[350,630)	(0.5,0.8)	(420,680)	[0.5,0.7)	640
强岩爆	<2.5	≥ 1172	≥ 0.55	≥ 630	>0.8	>680	≥ 0.70	830

岩爆预测分析结果,对于硬质脆性岩类地段的围岩,在隧道埋深 <113 m 时,不会发生岩爆,埋深在 113 ~ 350 m 范围,有岩爆发生的可能或发生轻微岩爆,埋深 >350 m 会发生中等岩爆。因此,在隧道设计时应根据隧道岩爆强度等级采取有效的防治措施。

根据隧道围岩分级对易发生岩爆的区段进行统计,统计结果见表 3、表 4。

表 3 隧道左线易发生岩爆区段

起讫桩号	最大埋深/m	围岩级别	岩性	岩爆级别
K11 + 750 ~ K13 + 000	457	II	寒武系中统张夏组灰岩	中等
K13 + 000 ~ K14 + 085	598	III	寒武系中统张夏组灰岩	中等
K14 + 085 ~ K14 + 695	509	II	寒武系中统张夏组灰岩	中等
K15 + 580 ~ K16 + 950	487	III	寒武系上统凤山组白云岩	中等
K17 + 520 ~ K18 + 310	427	III	奥陶系下统白云岩	中等
K19 + 020 ~ K20 + 030	568	III	奥陶系中统下马家沟组角砾状灰岩	中等
K20 + 030 ~ K21 + 610	329	II	奥陶系中统下马家沟组灰岩	轻微

4 结论

隧址区最大主应力为水平应力,方向为 NS 向,测试结果为 3.7 ~ 15.2 MPa,岩体应力量级为中等~高应力水平;在隧道埋深小于 113 m 时,不会发生岩爆,埋深在 113 ~ 350 m 范围,有岩爆发生的可能或发生轻微岩爆,埋深超过 350 m 会发生中等岩爆,

应采取有效的防治措施。

表 4 隧道右线易发生岩爆区段

起讫桩号	最大埋深/m	围岩级别	岩性	岩爆级别
YK11 + 650 ~ YK13 + 000	441	II	寒武系中统张夏组灰岩	中等
YK13 + 000 ~ YK14 + 100	610	III	寒武系中统张夏组灰岩	中等
YK14 + 100 ~ YK14 + 750	530	II	寒武系中统张夏组灰岩	中等
YK15 + 550 ~ YK16 + 880	500	III	寒武系上统凤山组白云岩	中等
YK17 + 620 ~ YK18 + 470	439	III	奥陶系下统白云岩	中等
YK19 + 020 ~ YK20 + 100	559	III	奥陶系中统下马家沟组角砾状灰岩	中等
YK20 + 100 ~ YK21 + 580	303	II	奥陶系中统下马家沟组灰岩	轻微

参考文献:

- [1] 刘佑容,唐明辉.岩体力学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,1999.164-167.
- [2] 铁道部第一勘测设计院.铁路工程地质手册[M].北京:中国铁道出版社,2002.566-571.
- [3] 将丽丽,林从谋,李伟.深埋长大公路隧道岩爆机理及其评判方法[J].山西建筑,2011,37(7):137-138.
- [4] 李永松,陈建平,尹健民.抢风岭隧道围岩地应力场研究及岩爆预测分析[J].人民长江,2011,42(7):15-18.
- [5] 李春杰,李洪奇.秦岭隧道岩爆特征与施工处理[J].世界隧道,1999,(1):36-41.
- [6] 李忠,杨腾峰.福建九华山隧道岩爆工程地质特征分析与防治措施研究[J].地质与勘探,2005,41(2):81-84.

西藏罗布莎科学钻探项目胜利竣工

本刊讯 10月9日,西藏罗布莎科学钻探施工胜利竣工,现场举行了隆重的竣工典礼。中国地质调查局党组副书记、副局长王研,西藏人大常委会副主任多吉院士,中国地质科学院副院长、深部探测专项首席科学家董树文研究员,项目负责人杨经绥研究员和许志琴院士,以及有关单位的领导专家、媒体记者、施工人员共 100 余人参加了竣工典礼并表示祝贺。

西藏罗布莎科学钻孔位于西藏山南地区曲松县罗布莎铬铁矿,海拔 4500 m,由山东省第三地质矿产勘查院承担施工任务,于 2009 年 6 月开始施工,先后完成了 2 个钻孔,终孔深度分别为 LSD-01 孔 1478.80 m, LSD-02 孔 1853.79 m。钻孔地处地质条件复杂、构造运动剧烈的雅江缝合带,地层松散

破碎,裂隙发育。施工人员克服海拔高、孔壁坍塌掉快、埋钻事故频发等诸多难题,不畏艰难,艰苦奋斗,历时 3 年多时间终于完成被称为“青藏高原第一钻”的施工任务。

罗布莎科学钻探施工的 2 个钻孔,所钻地层从“特提斯喜马拉雅”穿过“雅鲁藏布江缝合带”,直达“冈底斯岩浆带”,为揭示印度板块与亚洲板块碰撞边界和过程等一系列重大地质科学问题的研究提供了重要依据,进而为该区铬铁矿深部找矿突破提出重要的理论根据,同时也为高原深部钻探施工积累了丰富经验。10月8日,部分专家还听取了施工人员的汇报,并对该项目进行了竣工现场验收。

(陈师逊 张敏 供稿)