

开绕一号公路隧道岩爆强度评判

赵勇进

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川成都 610072)

摘要:开绕一号公路隧道在施工过程中部分隧道段岩爆突出、频繁,对施工造成了一定影响。阐述了采用3种判定岩爆强度的方法,从定性及定量的角度进行综合分析判定的过程,结果表明:该公路隧道岩爆强度已达到中等岩爆级别,超过了勘察设计阶段预测的弱岩爆级别。该岩爆强度判定结果为该工程施工预防岩爆提供了依据。

关键词:公路隧道;岩爆;地应力;强度评判;猴子岩水电站

中图分类号:TV554;TV223.1;[TV221.2]

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2016)06-0074-05

1 概述

开绕一号公路隧道位于大渡河猴子岩水电站库区,为库区S211线淹没复建工程,隧道全长3 238 m,隧道建筑界限为9 m×3.5 m,隧道位于斜坡中上部。隧道围岩岩性为志留系通化组(St)大理岩、变质灰岩和奥陶系巧家组(O₃)千枚岩,岩体主要为块状结构和薄层结构。Ⅳ类围岩段长824 m,占隧道总长度的25.4%,Ⅲ级围岩段长2 414 m,占隧道总长度的74.6%。

设计单位施工建议提示:开绕一号公路隧道在埋深较大时可能发生弱岩爆。自2013年6月22日(桩号K12+920)起,开绕一号隧道出口端开挖面频繁发生岩爆,且其距设计图纸中可能发生弱岩爆的桩号K12+745相差175 m。岩爆发生时声响巨大,有明显的岩爆闷响声,掌子面有飞石弹射出来,飞行距离约5~20 m。进口端从桩号K11+085起,岩爆现象突出,掌子面有较强的爆裂弹射现象且持续时间较长,已明显超过招标图纸所示的岩爆范围(K11+185~K12+745)。岩爆等级根据岩爆的破坏性及现场描述可能已达到中等岩爆级别,超过了原设计时预测的弱岩爆级别。基于以上情况,笔者受施工方委托,结合现场调查统计,对开绕一号隧道岩爆强度级别从定性及定量的角度出发给予了专业评判。

2 岩爆的表现特征

在高地应力区,岩体中蓄积着较高的弹性应变能,在洞室开挖过程中,由于应力重新分布,在洞壁附近产生应力集中,当集中的应力超过岩体

破碎强度时,岩体中的应变能就会突然释放出来,使岩体发生猛烈的脆性失稳破坏,破坏后的岩块弹射出来,这一岩体破坏形式即为岩爆。

(1)岩爆的发生有强有弱。据开绕一号公路隧道岩爆的调查及统计,在岩爆发生时伴有清脆的“啪、啪”声响并伴有撕裂声,围岩表层有爆裂脱落剥离现象,为较弱岩爆,是围岩内弹性应变能外泄引发的弹射岩块发出的声音,所产生的小块状爆体具有一定的冲击力,小爆体形状以薄片状居多。岩爆发生时发出沉闷的声响,所弹射的岩块具有较强的弹射力,产生的爆块较大,为较强岩爆,爆块外薄内厚。而在K12+920段开挖掌子面发生的岩爆,所产生的爆块最大块径为0.4 m×0.3 m×0.15 m,岩爆发生时声响巨大,掌子面飞石弹射的最大距离约为20 m。

(2)岩爆多发生在爆破作业后2~3 h时间段,但也有滞后(6~12 h);岩爆一般在爆破后2 h左右表现的比较激烈,以后则趋于缓和。岩爆发生的地点多数在新开挖的工作面及其附近,一般在距离掌子面12 m范围内为岩爆高发区,但也有延后至50 m处的特例。

(3)岩爆的发生在一定程度上受洞室埋深(指垂直埋深,下同)控制。表1中的统计结果表明:发生岩爆的洞段埋深大多大于300 m,洞室埋深较大,地应力高,为岩爆的发生创造了地应力条件。

(4)发生岩爆区域的岩体大多新鲜、完整,不渗水,岩体类别为Ⅲ级。表2中的统计资料表明:在中厚层或中厚层~厚层状岩体中,岩爆表现的尤为突出;而在薄~极薄状岩体中则不易发生岩

收稿日期:2016-06-06

表1 洞室埋深与发生岩爆关系表

序号	洞室埋深及桩号/m	岩爆发生情况
1	130(桩号 k13+481)	无岩爆
2	260(桩号 k13+173)	无岩爆
3	230(桩号 k13+330)	无岩爆
4	370(桩号 k12+792)	岩爆有强有弱
5	390(桩号 k12+786)	岩爆有强有弱
6	410(桩号 k12+760)	岩爆有强有弱
7	378(桩号 k12+856.5)	岩爆有强有弱
8	370(桩号 k12+810)	岩爆有强有弱
9	460(桩号 k11+455.2)	岩爆有强有弱
10	470(桩号 k11+095.2)	岩爆有强有弱
11	560(桩号 k11+964)	岩爆有强有弱

爆,但偶有较弱岩爆发生。

3 岩爆强度的评判

若要判定岩爆强度,首先应对岩爆进行分级。分级的目的是为了更好地了解预测预防岩爆的发生,为施工建设提供服务。目前国内外普遍采用的分级判定方法有:Russense 岩爆判定法;强度应力比判定法;依据岩爆发生的剧烈程度判定法。其中,Russense 及强度应力比判定法为定量判定方法,而依据岩爆发生的剧烈程度判定法为定性方法,笔者简述如下:

(1) Russense 岩爆判定法。

Russense 岩爆判定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 的关系建立岩爆烈度关系图。将点荷载 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是否有岩爆发生。其判别关系如下:

- $\sigma_\theta/R_c < 0.2$ (无岩爆)
- $0.2 \leq \sigma_\theta/R_c < 0.3$ (弱岩爆)
- $0.3 \leq \sigma_\theta/R_c < 0.55$ (中等岩爆)
- $\sigma_\theta/R_c \geq 0.55$ (强岩爆)

判别式中, σ_θ/R_c 为岩爆系数,可作为判断岩爆级别的定量指标。

根据弹性力学理论,围岩的最大切向应力可以通过以下方法进行推导:

基本假设:

- ①岩体均质,各向同性,连续体。
- ②仅考虑由自重应力形成天然应力场。
- ③忽略洞室高度的应力场变化。
- ④为平面应力问题。

表2 洞室开挖掌子面处岩爆发生统计表

序号	桩号/m	岩层性状	围岩类别	岩爆发生情况
1	K13+030	中厚夹薄层	Ⅲ	无岩爆
2	K13+015	中厚夹薄层	Ⅳ	无岩爆
3	K12+992	中厚夹薄层	Ⅳ	无岩爆
4	K12+931	薄层	Ⅳ	无岩爆
5	K12+909	薄层	Ⅲ	无岩爆
6	K12+887	薄层	Ⅳ	无岩爆
7	K12+857	中厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
8	K12+847	中厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
9	K12+834	中厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
10	K12+810	中厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
11	K12+786	中厚-厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
12	K12+760	中厚-厚层	Ⅲ	岩爆突出,有强有弱
13	K12+714	薄-极薄层	Ⅲ	岩爆较弱
14	K12+687	薄-极薄层	Ⅳ	岩爆较弱
15	K12+659	薄-极薄层	Ⅳ	无岩爆
16	K12+637	薄-极薄层	Ⅳ	岩爆较弱
17	K12+612	薄-极薄层	Ⅳ	岩爆较弱
18	K12+596	薄-极薄层	Ⅳ	无岩爆
19	K12+562	薄-极薄层	Ⅳ	无岩爆
20	K12+539	薄-极薄层	Ⅲ	岩爆较弱
21	K12+517	薄-极薄层	Ⅳ	无岩爆
22	K12+482	薄-极薄层	Ⅳ	无岩爆
23	K12+450	薄-中厚层	Ⅲ	无岩爆
24	K12+400	薄-中厚层	Ⅲ	无岩爆

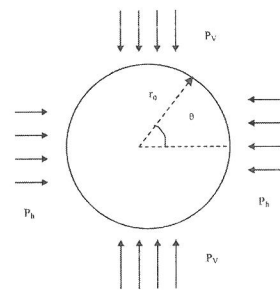


图1 圆形洞室天然应力场示意图

对于圆形洞室(图1),开挖前的天然应力 P_v 为:

$$P_v = \gamma H, \quad P_h = K_0 P_v。$$

当洞室开挖后,洞壁切向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 以及剪应力 τ, θ 按下列公式计算:

$$\sigma_r = \frac{P_h + P_v}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \left(\frac{P_h - P_v}{2} \right)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_h + P_v}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \left(\frac{P_h - P_v}{2} \right) \left(1 - \frac{4r_0^2}{r^2} + \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_h - P_v}{2} \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2} - \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \sin 2\theta$$

式中 P_v 为铅直方向的压应力(MPa); P_h 为水平方向的压应力(MPa); γ 为岩石容重; H 为洞室埋深(自洞室中心算起); r_0 为洞室半径(m); r 为自洞室中心起算的径向距离(m); θ 为自水平轴算起的极坐标中的角度。

考虑到洞室处于等压状态,即 $K_0 = 1, P_v = P_h$ 时,洞壁切向应力 σ_{θ} 为:

$$\sigma_{\theta} = P_v \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right)$$

当 $r = r_0$ 时,洞壁最大切向应力 $\sigma_{\theta} = 2P_v = 2\gamma H$ 。

依据以上岩爆系数计算方法,取大理岩岩石容重 $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, R_c 采用室内试验结果值,对隧道部分洞段围岩岩爆系数进行计算的结果见表3。结果显示:开绕一号公路隧道出现的岩爆级别已达到中等岩爆。

表3 部分洞段围岩岩爆系数计算结果表

序号	桩号/m	隧洞埋深 H /m	抗压强度 R_c /MPa	岩爆系数 σ_{θ} / R_c	岩爆判定结果
1	K12+920 ~ K12+836	370	56	0.32	中等岩爆
2	K12+836 ~ K12+808	375	59	0.31	中等岩爆
3	K12+808 ~ K12+745	410	61	0.32	中等岩爆
4	K12+044	555	58.7	0.45	中等岩爆
5	K11+095.2	470	58.7	0.38	中等岩爆
6	K11+455.2	450	58.7	0.37	中等岩爆
7	K11+964	560	58.7	0.46	中等岩爆

(2)强度应力比判定法。

在国内外工程中,通常用岩石湿抗压强度(R_c)与最大主应力(σ_1)的比值(简称强度应力比)作为评价岩爆发生强弱的定量指标。

陶振宇教授在总结多个工程经验的基础上,修改了挪威曾采用的巴顿法,提出了新的判别岩爆的方法,其判别关系如下:

- $R_c / \sigma_1 > 14.5$ (无岩爆)
- $5.5 \leq R_c / \sigma_1 \leq 14.5$ (弱岩爆)
- $2.5 \leq R_c / \sigma_1 < 5.5$ (中等岩爆)
- $R_c / \sigma_1 < 2.5$ (强岩爆)

猴子岩水电站库区 S211 线淹没复建工程在勘察阶段未进行现场地应力测试。由于该工程距猴子岩水电站厂房距离约 7 km,区域地质及岩层岩性基本相似,故可以采用工程类比方法、参考猴子岩水电站厂房实测地应力资料(表4)进行岩爆强度的判定。

采用实测最大主应力来判定岩爆强度级别,结果见表5,从表5中可以看出,在埋深不超过600 m时,发生的岩爆级别为中等岩爆;埋深接近或超过600 m时,发生的岩爆级别已达到强岩爆。根据岩爆发生的实际情况及特点进行综合判断,目前该公路隧道没有发生强岩爆,岩爆仅为弱岩爆及中等岩爆。

表4 猴子岩水电站厂房岩体地应力测试结果表

测试方法	测点水平埋深/m	测点垂直埋深/m	最大主应力 σ_1 量值/MPa	σ_1 方向	备注
孔径变形法	253	390	21.33	N44.3°W	有岩爆
	250	440	21.46	N73.8°W	
	400	560	29.06	N69.9°W	
	400	570	28.07	N54.5°W	岩爆频繁
	480	600	34.77	N90°W	
	525	770	33.45	N74.7°W	

表5 用实测的最大主应力量值判定岩爆强度表

序号	隧洞埋深 H /m	抗压强度 R_c /MPa	最大主应力 σ_1 /MPa	强度应力比 R_c / σ_1	岩爆判定结果
1	390	80	21.33	3.75	中等岩爆
2	440	80	21.46	3.73	中等岩爆
3	560	80	29.06	2.75	中等岩爆
4	570	80	28.07	2.85	中等岩爆
5	600	80	34.77	2.3	强岩爆
6	780	80	33.45	2.39	强岩爆

备注:测点岩性为变质灰岩,湿抗压强度采用室内试验平均值。

(3)根据岩爆发生的剧烈程度判定法。

目前国内外大多以岩爆发生的剧烈程度将岩爆划分为(弱)轻微、中等、强烈、剧烈4级(表6)。

依据该公路隧道的工程特点,笔者最终决定采用“二郎山公路隧道高应力与围岩稳定性课题组”分级标准。据该工程隧道开挖掌子面岩爆特

点(表7)、岩爆发生时的声响类型、岩块弹射特点、岩体破坏形式以及对施工影响程度等因素判定该隧道岩爆强度级别为弱岩爆和中等岩爆。通过采用以上3种方法进行综合判定得知:开绕一号公路隧道岩爆级别已达到中等岩爆。

表6 国内外岩爆烈度分级依据表

方案提出者	岩爆烈度分级的主要依据			
G. 布霍依诺(德国,1981年)	轻微损害 不造成生产中断	中等损害 支架部分损坏,一般需中断生产 2级:中等岩爆,岩石有不容忽视的片落及松脱,有随时间发展的趋势,有发自岩石内部的强烈炸裂声	严重损害 工程被摧毁	
B. F. 拉森斯(挪威,1974年)	(0级:无岩爆)1级:轻微岩爆,岩石有松脱破裂现象,声响微弱	中等岩爆(II):“劈裂-剪断-弹射”重复交替发生,向洞壁内部发展,形成V形三角形坑,洞壁有较大范围破坏;对生产威胁不大,个别情况下损坏设备;有似子弹射击声	3级:严重岩爆后,顶板及两帮岩石严重崩落,底板隆起,周边大量超挖和变形,可以听到发射子弹、炮弹的强烈声响	
谭以安(1988年)	弱岩爆(I):围岩表层有爆裂脱落、剥离现象,内部有噼啪、撕裂声响;岩爆零星间断发生,对施工影响甚微	中等岩爆(II):“劈裂-剪断-弹射”重复交替发生,向洞壁内部发展,形成V形三角形坑,洞壁有较大范围破坏;对生产威胁不大,个别情况下损坏设备;有似子弹射击声	强烈岩爆(III):“劈裂-剪断-弹射”急速发生,并急剧向洞壁深处扩展;几乎全断面破坏,生产中断;有似炮声巨响	极强岩爆(IV):方式同III,持续时间长,震动强烈,有似闷雷强烈声响;人财损失严重,生产停顿
交通部第一公路设计院(1996年)	微弱岩爆(一级):岩石个别松脱和破裂,有微弱声响	中等岩爆(二级):有相当数量的岩片弹射和松脱,洞内周边岩体变形,有随时间发展趋势,有的岩体有较强烈的爆裂活动	剧烈岩爆(三级):顶板及侧壁围岩发生严重的岩片弹射,甚至有巨石抛射,其声响如炮弹爆炸,底板隆起,洞壁周边变形严重,可引起洞室坍塌	
二郎山公路隧道高应力与围岩稳定性课题组(1998年)	轻微岩爆(I):围岩表层有爆裂脱落、剥离现象,内部有噼啪、撕裂声响;岩爆零星、间断发生,对施工影响甚微	中等岩爆(II):围岩爆裂脱落、剥离现象较严重,有弹射,可听见清脆的沉闷响声,有一定的持续时间,影响深度可达1m左右;对施工有一定影响	强烈岩爆(III):有强裂的爆裂弹射,有似机枪子弹射击声,岩爆具有延续性并向围岩深部发展,影响深度可达2m左右;对施工影响较大	剧烈岩爆(IV):出现剧烈的爆裂弹射甚至抛掷性破坏,有似炮弹巨响声,岩爆具有突发性并迅速向围岩深部发展,影响深度可达3m左右;严重影响甚至摧毁工程

表7 部分洞段围岩岩爆特点描述表

序号	桩号/m	掌子面岩爆发生情况	岩爆判定结果
1	K12+857	岩爆较为突出,岩块有弹射现象,有岩块弹射伤人事件发生。爆破2.5h后侧拱腰部位发生较强岩爆,伴随一声闷响,直径达1.4m的石块应声而下,石块呈中间厚、边缘薄的扁平不规则形状,对施工有影响	中等岩爆
2	K12+834	岩爆较为突出,岩体发出较大的闷声响;有岩块弹射现象,弹射距离约5~20m,有片帮、掉块,发生岩块弹射伤人事件并有多人受伤,对施工有影响	中等岩爆
3	K12+810	岩爆现象较为突出,岩体发出较大的闷声响;有片帮、掉块、少量岩块弹射现象,发生岩块弹射伤人事件,对施工有影响	中等岩爆
4	K12+786	岩爆现象较为突出,岩体发出较大的闷声响;有片帮、掉块,对施工有影响	中等岩爆
5	K12+760	岩爆现象较为突出,岩体发出较大的闷声响;有片帮、掉块,对施工有影响	中等岩爆
6	K12+714	围岩爆裂脱落、剥离现象较严重,有弹射,可听见沉闷的响声,对施工有影响	中等岩爆
7	K12+687	岩爆零星、间断发生,围岩表层有爆裂脱落、剥离现象,内部有噼啪、撕裂声响,对施工影响较小	轻微(弱)岩爆
8	K12+637	岩爆零星、间断发生,岩体片帮、剥落较为明显,内部有噼啪声响,对施工影响较小	轻微(弱)岩爆
9	K12+612	岩爆零星、间断发生,岩体片帮、剥落较为明显,内部有噼啪声响,对施工影响较小	轻微(弱)岩爆
10	K12+539	岩爆零星、间断发生,岩体片帮、剥落较为明显,内部有噼啪声响,对施工影响较小	轻微(弱)岩爆
11	K11+455.2	岩爆持续强烈,有岩块弹射现象并伴有明显的爆裂声,岩爆持续时间近7h,对施工有影响	中等岩爆
12	K11+964	岩爆持续强烈且密集,有岩块弹射现象,伴有明显的爆裂声,岩爆平均15~25min发生一次,持续时间近12h,对施工进度有影响	中等岩爆
13	K11+095.2	岩爆持续强烈,有石块抛掷弹射现象,伴有明显的爆裂声,岩爆平均15~20min发生一次,持续时间近6h,对施工有一定影响	中等岩爆

4 结 语

(1)采用 Russense 岩爆判定法进行评定的结

果显示,目前该隧道发生的岩爆最高级别为中等岩爆。但该判定方法具有一定的局限性,其仅考

虑了岩体自重应力,未考虑构造应力的存在,因此,采用该方法判定取得的结果往往偏于保守。

(2)采用强度应力比方法判定岩爆强度,其结果显示:在埋深不超过600 m时,发生的岩爆级别为中等岩爆;埋深接近或超过600 m时,发生的岩爆级别已达到强岩爆。根据岩爆发生的实际情况及特点进行综合判断,目前该公路隧道没有发生强岩爆,岩爆仅为弱岩爆及中等岩爆。

(3)根据岩爆发生的剧烈程度,依据岩爆发生时的声响类型、岩块弹射特点、岩体破坏形式及对施工的影响程度等因素,最终判定该隧道岩爆强度级别为弱岩爆和中等岩爆。

(4)采用以上三种方法进行综合判定,开绕一号公路隧道岩爆级别为中等岩爆。

参考文献:

- [1] 谷明成,何发亮,陈成宗,秦岭隧道岩爆的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1325-1328.
- [2] 陈祥,孙进忠,等.岩爆的判别指标和分级标准及可拓综合判别方法[J].土木工程学报,2009,28(9):82-86.
- [3] 张镜剑,傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2037-2039.
- [4] 张晓春.煤磁盘岩爆发生机制研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):492-494.
- [5] 文畅平.属性综合评价系统在岩爆发生和烈度分级中的应用[J].工程力学,2008,25(6):153-157.
- [6] 张永习.可拓综合评判在某水工隧洞岩爆等级评价中的应用[J].山东大学学报,2012,42(2):58-63.
- [7] DL/T5367-2007,水电水利工程岩体应力测试规程[S].

作者简介:

赵勇进(1970-),男,陕西富平人,高级工程师,学士,从事岩石力学试验研究工作.

(责任编辑:李燕辉)

(上接第66页)

④通过对GQ-127b中风压贯通式潜孔锤、GQ-127c高压潜孔锤进行现场钻进试验,充分验证了贯通式潜孔锤反循环钻进技术的先进性,反循环效果良好,既实现了高效的碎岩效率、较高的成孔质量,又实现了作业现场的环保要求,提高了职业健康水平。

3 社会与经济效益

3.1 经济效益

潜孔锤正循环钻进工艺的钻进成本单价约为118.6元/m,而潜孔锤反循环钻进工艺由于没有重复破碎岩体,因此,占钻孔成本较大部分的钻头及冲击器寿命提高,冲击器寿命提高4.6倍,钻头寿命提高3.2倍,反循环基本不需要钻进介质——水,而且降低了防斜纠偏、孔内故障处理等费用,综合钻进成本约为76.4元/m。

3.2 社会效益

(1)工期方面。

贯通式潜孔锤反循环钻进技术与潜孔锤正循环钻机相比,贯通式潜孔锤反循环钻进技术在破碎、断层区的综合效率比潜孔锤正循环钻机提高了1.2倍,按锦屏一级水电站左岸基础处理工程排水孔工程量10万m计算,可以提前工期8个月,缩短了施工周期。

(2)质量方面。

在锦屏一级水电站左岸基础处理工程复杂的

地质条件下,潜孔锤正循环钻进工艺的孔斜率(孔底偏距与孔深的比值)约为3%~5%,发生孔内事故的几率约为6.5%~11.5%,而采用贯通式潜孔锤反循环钻进工艺,孔斜率约为2.5%~3.5%,孔内故障率约为5%~8%,从而有效降低了孔斜率和孔内事故的发生,提高了钻孔质量。

(3)环保方面。

采用潜孔锤反循环钻进工艺,减少污水1865 m³排放,减少108.35 t粉尘排放,施工工作面噪音由常规钻进工艺的94 dB(A)减小到82 dB(A)。

4 结语

贯通式潜孔锤反循环钻进技术具有钻进效率高、岩样采取率高、钻孔质量好、以气代水等特点,钻孔成本较低,对极复杂地层适应能力强,可广泛用于在建和待建的水利水电工程施工,其在锦屏水电工程中的首次应用,在全国水电行业起到了先头兵作用,提高了中国水电七局公司的科技竞争力。根据国内目前的施工状况看,贯通式潜孔锤反循环工艺在水利水电行业廊道灌浆孔、排水孔及复杂地质条件下高边坡锚索施工领域的应用前景十分广阔,未来还将用于道路、桥梁、市政建设等行业领域。

作者简介:

刘均锋(1984-),男,河南获嘉人,锦屏一级CV标副主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术和管理的工作。

(责任编辑:李燕辉)