

高地应力对深埋隧道围岩分级及稳定性的影响

程栋¹ 龙顺军² 王昇²

1 云南省有色地质局勘测设计院 2 西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i6.1842

[摘要] 在山区高速公路建设中,深埋隧道地质环境条件复杂,而围岩分级直接关系到隧道设计的合理性、施工的安全性和运营的可靠性。本文以白土克隧道部分段围岩分级为例,分析了其地应力状况和围岩分级结果,初步阐述了高地应力对围岩稳定性的影响,为后期隧道工程围岩支护设计及施工提供了一定的参考。

[关键词] 高地应力; 围岩分级; 稳定性

中图分类号: U451+.2 **文献标识码:** A

The influence of high ground stress on the classification and stability of surrounding rock in deep buried tunnels

Dong Cheng¹ Shunjun Long² Sheng Wang²

1 Survey and Design Institute of Yunnan Nonferrous Geological Bureau

2 Southwest Nonferrous Kunming Survey and Design (Institute) Co., Ltd

[Abstract] In the construction of mountainous highways, the geological environment and geostress conditions of deep buried tunnels are complex, and rock classification is a fundamental and important technical work; This article takes the classification of surrounding rock in some sections of the Baituke Tunnel as an example, analyzes its stress conditions and rock classification results, and preliminarily expounds the influence of high ground stress on the stability of surrounding rock, providing a certain reference for the design and construction of surrounding rock support in later tunnel engineering.

[Key words] high ground stress; Rock classification; stability

白土克隧道工程位于红河县大洋街乡白土克村附近,与红土坡河大桥、妥洛隧道呈顺时针旋转的“螺旋”展线布置,研究分析段K7+960~K9+360m埋深435m。隧道埋深大,在隧道围岩分级过程中存在诸多影响因素,如地质条件、地下水、高地应力等影响。围岩分级是一项既基础又重要的技术工作^[1],分析高地应力对隧道围岩分级及稳定性的影响具有重要的现实意义。

1 区域地质条件

隧址区内属浅切割低中山构造侵蚀、剥蚀地貌区,海拔高程介于630~1452m之间,相对高差约622m,地形起伏大。

隧址区位于藏滇地槽褶皱系的横断山地槽之东南部,属青藏高原“歹”字型构造体系东支中段复合部位,著名的云南“山”字型构造建水弧顶前缘与哀牢山构造带中段复合区域。隧道处于红河逆深大断裂及垭下一拉旗一藏迷逆断裂构造夹持带,沿线无断层穿过。

1.1 地层岩性

隧道区段范围内地基覆盖层为第四系坡残积层(Q₄^{dl+el})粉质粘土为主,下伏基岩为阿龙组上亚组(Pta^b)片麻岩。

粉质黏土:黄灰色、灰色,稍湿,硬塑状态,切面较粗糙,干强度中等,韧性中等,含少量强风化花岗岩片麻岩角砾、碎石,含量约15%。

片麻岩:浅灰、深灰色,变晶结构、片麻状构造,局部夹变粒岩薄层;节理裂隙较发育;区段内中风化岩体完整性系数Kv=0.65~0.74,岩体较完整;中风化岩石饱和抗压强度Rc=53.4MPa。

1.2 水文地质条件

隧址区地下水类型主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水;地下水主要靠大气降水和地表溪沟水补给。对隧道影响大的为基岩裂隙水,且为隧址区主要地下水类型,主要为变质岩类裂隙水,赋存于片麻岩、变粒岩等变质岩类的构造裂隙和风化裂隙中。

通过对隧址区地质构造、含水岩组、地形地貌、各级河流及泉点的调查,结合物探、钻探揭露地下水分布情况、水文试验等资料,分段计算评价隧道的涌水量及危害程度,结果为:隧道里程K7+600~K9+800m段预测涌水量约27748.9m³/d,本区段地下水文地质条件相对较复杂,地下水较丰富。

2 地应力分析

2.1 主应力测试结果

为了获取隧道围岩的地应力大小和方向, 根据钻孔的地质条件、岩芯RQD、测井数据及钻孔沉渣等初始资料, 自上而下逐段逐次, 在K8+480m处ZK7-2钻孔内采用水压致裂法进行了5段地应力测试工作, 主应力测试结果见表1。

表1 ZK7-2钻孔水压致裂地应力测试结果

序号	测段深度 (m)	压裂参数 (MPa)						主应力值 (MPa)		
		$P_{b\text{地面}}$	$P_{r\text{地面}}$	$P_{s\text{地面}}$	P_v	P_0	T	S_H	S_h	S_v
1	136	10.38	7.78	3.9	1.36	0.89	2.6	5.75	5.26	3.62
2	210	8.38	7.14	4.12	2.1	1.63	1.24	7.79	6.22	5.59
3	292	7.48	7.43	4.87	2.92	2.45	0.05	10.57	7.79	7.77
4	360	8.64	6.4	5.13	3.6	3.13	2.24	13.06	8.73	9.58
5	422.6	16.29	13.26	8.28	4.23	3.76	3.03	16.27	12.51	11.24

表中 S_H 为最大水平主应力, S_h 为最小水平主应力, S_v 为垂直主应力

2.2 主应力方向测试结果

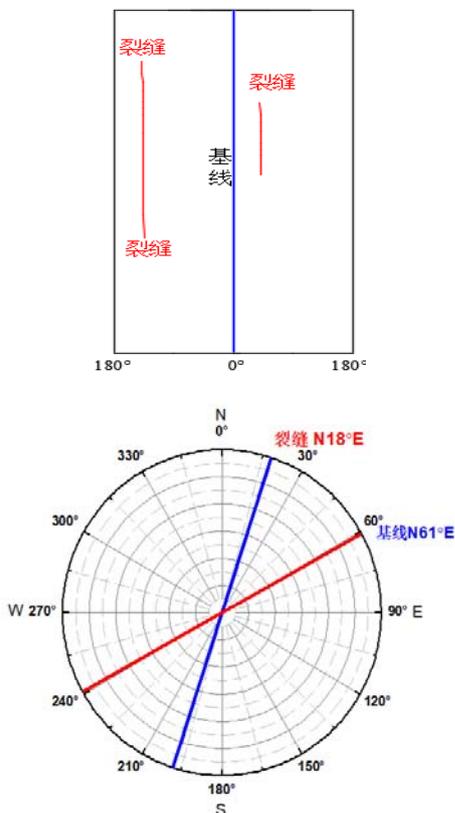


图1 ZK7-2钻孔422.60m段最大水平主应力方向印模

根据水压致裂法地应力测试的基本原理, 水压致裂所产生的裂缝走向就是最大水平主应力的方向。钻孔压裂结束后, 采用装有电子定向仪的印模器, 在422.60m测段进行了最大水平主应力方向的印模测定, 破裂方向为 $N18^\circ E$, 见图1。

2.3 地应力分布规律及状态

根据测试深度136.00~422.60m段最大水平主应力值为5.75~16.27MPa, 最小水平主应力值为5.26~12.51MPa。从应力与深度的关系看, 应力随深度增大呈增加的趋势, 见图2。

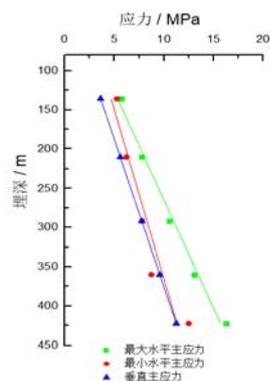


图2 钻孔三向主应力深度分布图

依据地应力测试和岩块单轴饱和抗压强度试验结果, 按《工程岩体分级标准》(GB/T50218-2014)及《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1-2018)对初始地应力状态等级进行划分, 其划分关系如下^[1]:

$$\begin{cases} \text{极高应力: } R_c / \sigma_{\max} < 4 \\ \text{高应力: } 7 \geq R_c / \sigma_{\max} \geq 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_c —岩石饱和单轴抗压强度 (MPa)

σ_{\max} —垂直洞轴线方向的最大初始应力 (MPa)

根据岩块试验及测试结果, 将岩石饱和单轴抗压强度 $R_c=53.4\text{MPa}$ 代入(1)式中, 则 $R_c / \sigma_{\max}=3.28 < 4$, 本区段属极高应力区。

表2 公路隧道围岩级别划分

围岩级别	基本质量指标BQ或岩体修正质量指标[BQ]
I	>550
II	550~451
III	450~351
IV	350~251
V	≤250

3 围岩分级分析

隧道围岩分级参考《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1-2018)进行两步分级的方法,对隧道围岩级别进行综合评判,即分别对岩体基本质量指标BQ、岩体修正质量指标[BQ]进行计算,按表2确定围岩级别^[2]。

3.1 初步分级

按岩石的坚硬程度和岩体完整程度对围岩基本质量指标BQ进行初步分级,围岩基本质量指标BQ根据岩石单轴饱和抗压强度Rc值和岩体完整性系数Kv值按下式进行计算^[3]:

$$BQ = 100 + 3R_c + 250K_v \quad (2)$$

并应遵守下列限制条件:

- ①当 $R_c > 90K_v + 30$ 时,应以 $R_c = 90K_v + 30$ 和 K_v 代入计算BQ值;
- ②当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时,应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 代入计算BQ值;

BQ值:

③ $K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2$, V_{pm} —岩体纵波速度, V_{pr} —岩块纵波速度。

根据地质调查、物探成果及岩石室内试验成果,并结合以往类似工程经验取值,依据公式(2)对隧道里程K7+960~K9+360m各段围岩基本质量指标BQ值计算,并按表2进行围岩分级,具体结果见表3。

表3 围岩基本质量指标BQ值及围岩分级表

起止里程	Rc	V _{pm}	V _{pr}	K _v	BQ	围岩分级
K7+960~K8+200	53.4	4465	5196	0.74	445	III
K8+200~K8+840	53.4	3867	4793	0.65	423	III
K8+840~K9+360	53.4	4465	5196	0.74	445	III

由上表可知,隧道里程K7+960~K9+360m各段围岩基本质量指标BQ值为423~445,围岩分级为III级。

3.2 详细分级

在岩体基本质量指标BQ分级的基础上,根据地下水、主要软弱结构面、初始应力状态的影响程度,对围岩基本质量指标BQ按(3)式进行修正^[2],得出基本质量指标修正值[BQ]进行围岩详细分级。

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (3)$$

式中:K₁、K₂、K₃分别为地下水影响修正系数、主要软弱结构面产状影响修正系数及初始应力状态影响修正系数。

依据勘察资料及计算BQ值,结合《公路隧道设计规范》附录A中A.0.3条的修正系数取值要求进行取值,相应修正系数取值说明见表4。

将上述各项修正系数代入公式(3)进行计算,各分段围岩基本质量指标修正值[BQ]及围岩分级结果见表5。

表4 K₁、K₂、K₃修正系数取值说明表

BQ值	K ₁		K ₂		K ₃	
	地下水出水状态	取值	主要软弱结构面产状	取值	初始应力状态	取值
445	淋雨状出水	0.2	走向与洞轴线夹角>60°, 倾向79° 倾向83°	0.2	极高应力	1
423	淋雨状或涌状出水	0.4	走向与洞轴线夹角>60°, 倾向83° 倾向83°	0.2	极高应力	1
445	淋雨状出水	0.2	走向与洞轴线夹角>60°, 倾向83° 倾向83°	0.2	极高应力	1

表5 围岩基本质量指标修正值[BQ]及围岩分级表

起止里程	BQ值	K ₁	K ₂	K ₃	[BQ]	围岩级别
K7+960~K8+200	445	0.2	0.2	1	305	IV
K8+200~K8+840	423	0.4	0.2	1	263	IV
K8+840~K9+360	445	0.2	0.2	1	305	IV

由上表可知,围岩详细分级考虑了地下水、不利的软弱结构面、高初始应力的不利影响,在围岩基本质量指标的基础上进行一定的修正,隧道里程K7+960~K9+360m各段围岩修正质量指标[BQ]值为263~305,围岩分级为IV级。

3.3 围岩级别综合评判

根据上述围岩初步分级与详细分级的结果来看,围岩分级结果有所差别,二者相差一个级别。初步分级仅考虑了岩石坚硬程度和岩体完整程度,而岩石坚硬程度和岩体完整程度是岩体的基本属性,是各种岩石工程类型的共性,反映了岩体质量的基本特征,并不是影响岩体稳定的全部因素。当隧道围岩存在地下水、高初始应力、不利的软弱结构面等时,通过修正系数对初步分级结果进行调整,这一步考虑了更多实际工程中可能遇到的影响因素,使得围岩分级更加符合实际情况,具有较好的科学性和实用性。

同时也可以从上述计算结果中看出,高地应力、地下水的影响及不利软弱结构面等因素,对基本质量指标修正值及围岩分级起着控制作用^[5]。

4 高地应力对围岩稳定性的影响

在高地应力环境下,隧道围岩稳定性面临以下几方面影响:

(1)隧道开挖后围岩中的应力分布发生改变,应力分布更为复杂,应力集中现象更为明显^[3],将导致围岩内部产生裂纹和微裂缝,从而降低围岩的强度和稳定性。同时对支护结构的要求较高,支护结构需要承受更大的压力和变形,支护难度和成本相应增加。

(2)在高地应力环境下,岩体中的裂纹和微裂缝更容易扩展,使得岩体破碎,围岩完整性降低,岩体破碎程度加剧,导致围岩稳定性进一步减弱。

(3)高地应力会导致岩石的塑性变形,使得岩石的变形能力增强,但同时也会降低岩石的承载能力,容易发生岩爆、岩层移动等现象,对工程安全带来威胁。

(4)高地应力环境下,地下水活动会更加剧烈,容易引发岩体的软化和膨胀,降低围岩的稳定性。

综上所述,高地应力对隧道围岩稳定性具有显著影响,主要表现为应力集中、岩体破碎、围岩变形、岩爆风险以及支护难度增加等。针对高地应力环境下隧道围岩稳定性问题,需要采取相应的工程措施和技术手段,施工时应加强隧道的地质超前预报工作,以确保隧道施工和运营安全。

5 结束语

通过对白土克隧道深埋段采用水压致裂法进行了地应力测试,分析了该区段的地应力状态,并按现行规范推荐方法进行了围岩分级。在围岩分级过程中高地应力、地下水的影响及不利软弱结构面,对最终的围岩分级计算起到重要控制因素,直接影响着围岩分级的结果,

高地应力对深埋隧道围岩的稳定性也有着重要的影响。在高地应力条件下,围岩的应力状态、破坏模式和渗透性都会发生变化,这些变化都会对隧道的安全性产生影响。因此,在进行隧道设计和施工时,必须充分考虑高地应力的影响,以确保隧道的安全和稳定。

[参考文献]

[1]GB/T 50218-2014,工程岩体分级标准[S].

[2]JTG 3370.1-2018,公路隧道设计规范[S].

[3]罗敬中.高速公路隧道围岩稳定性探究[J].黑龙江交通科技,2013,(07):117.

[4]沈东东.高地应力围岩分级方法适宜性分析探讨[J].现代隧道技术,2009,46(7):43-47.

[5]余莉,尤哲敏,陈建平,等.高地应力地区隧道围岩分级研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):23-29.

作者简介:

程栋(1986-),男,汉族,云南宣威人,本科,水工环地质高级工程师,从事水文地质,工程地质,环境地质,地质灾害,岩土工程研究。