

文章编号 1001-8166(2004)增-0358-05

红层软岩隧洞围岩变形破坏机制研究

王子忠^{1,2}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与环境保护国家专业实验室 四川 成都 6100592 ;
2 四川省水利水电勘测设计研究院 四川 成都 611731)

摘要 红层软岩的物质组成、化学成分、物理力学性质等方面在国内外已有较系统的研究,但对软岩隧道围岩的变形破坏机理及其治理一直是工程技术人员关心问题。通过对回龙宫隧洞的地质环境分析及有限元数值计算,阐明了红层隧洞围岩的膨胀变形破坏机理,最后提出了在此类围岩中修建水工隧洞的过程中,防止围岩变形破坏的建议。

关键词 红层软岩;水工隧洞;围岩变形破坏机制
中图分类号 P642 文献标识码 A

0 引言

近年来,随着我国西部大开发战略的实施,在红层软岩中修建的工程越来越多,所面临的工程地质问题日益突出。由于红层软岩成生时代新,成岩胶结程度差,富含大量的膨胀性粘土矿物如蒙脱石、伊利石等,其物理力学性质差,常给工程建设尤其是地下工程实践带来诸多问题,甚至造成重大工程事故^[1]。目前国内外对软岩的物质组成、化学成分、物理力学性质等方面进行了较系统的研究,取得了丰硕的成果^[2,3]。但对软岩隧道围岩的变形破坏机理及其治理一直是工程技术人员关心和亟待解决的核心问题。本文结合四川升钟水库回龙宫围岩的变形特征,通过地质分析及数值模拟分析方法对该问题进行有益的探讨,该成果可作为同类工程实践的参考。

1 隧洞地质环境概述

1.1 地质条件

回龙宫隧洞位于四川省阆中县境内、四川盆地东北边缘的丘陵地区。构造上属川中旋扭构造体系

中台山半环状构造的八角场背斜北翼,据勘探与施工开挖资料,隧洞位于侏罗系上统蓬莱镇组(J_3p)紫红色粉砂质泥岩中,其间夹有灰白色砂岩透镜体。岩层产状 $N55^{\circ}E/NW 1^{\circ}$ 岩体完整,见图 1。按水利水电地下工程围岩分类方案,各段围岩类别划分如下:进出口段洞室位于弱风化粉砂质泥岩中,围岩类别属 II 类;洞身段;洞室位于新鲜粉砂质泥岩中,无地下水活动,围岩类别属 III 类。

1.2 隧洞围岩的主要物理力学特征

对组成隧洞围岩的紫红色粉砂质泥岩(红层)主要研究了其矿物成分、颗粒级配特点、分散度,常规物理力学指标及膨胀特性等特性,其成果见(表 1、2、3、4)。

表 1 紫红色粉砂质泥岩粘土矿物成分 X 射线
粉晶衍射测试结果表

Table 1 The X-ray silt crystals diffraction test results of
the violet-red silt mud rock's clay-mineral component

测试编号	粘土矿物含量(%)				
	伊利石	绿泥石	石英	长石	方解石
S0103	46	17	17	10	10
S0104	45	16	17	10	12

收稿日期 2004-04-26

作者简介:王子忠(1964-)男,四川省剑阁人,高级工程师,主要从事水利水电工程的岩体稳定及区域稳定研究。
E-mail: wangzishong1234@163.com

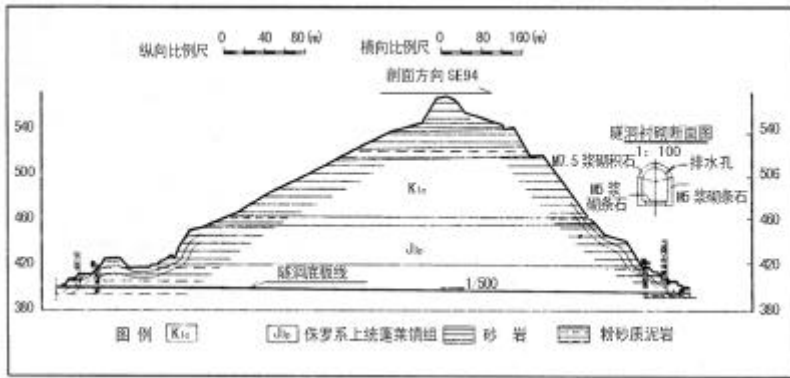


图1 回龙宫隧洞地质纵剖面图

Fig 1. The geological longitudinal profile of HuiLonggong tunnel

表2 隧洞粉砂质泥岩物理指标成果表

Table 2 The physical experimental results of the tunnel's silt mud rock

编号	比重	自由膨胀率	界限含水量			颗粒分析 (%)				土的名称	
			W _L	W _p	I _p	粒 径(m.m)					
						试验方法	>0.05	0.05 ~ 0.005	<0.005		分散度
粘1	2.74	35.0	31.2	17.8	13.4	加分散剂	16.0	49.5	34.5	96.2	粉质
粘2	2.74	36.0	31.8	17.0	14.8	不加分散剂	16.0	50.8	33.2		粘土

表3 隧洞围岩常规物理力学指标试验成果表

Table 3 The routine physics mechanical index results of tunnelsurrounding rock

岩性	比重	天然含水量	吸水率	孔隙率	抗压强度		软化系数	
					干	湿		
		g/cm ³	(%)	(%)	(MPa)			
粉砂质泥岩	2.69	2.38	2.96	6.03	14.0	23.2	14.8	0.45

在隧洞出口取相同层位的弱风化粉砂质泥岩其膨胀力试验成果见表4。

表4 粉砂质泥岩膨胀力测试成果表

Table 4 The tes results of swelling force of silt mud rock

编号	干密度 g/cm ³	试 前		试后饱和度	膨胀力 (MPa)
		含水率	饱和度(%)		
5_1	2.165	7.56	75.0	100	0.292
5_2	2.326	4.47	64.9	92.8	0.101
5_3	2.376	5.51	91.9	96.3	0.073
5_4	2.243	6.91	81.4	88.3	0.055

上述各种测试资料表明 隧洞粉砂质泥岩的主要工程地质特性如下：

(1) 作为隧洞围岩的粉砂质泥岩 其矿物成分以伊利石为主 其次为绿泥石 伊利石含量为45%

~46% 绿泥石含量为16% ~17% 伊利石与绿泥石总含量为62% ~63%。伊利石与绿泥石具有面-面叠聚的书状结构 为亲水性较强的矿物。

(2) 据文献[4] 当岩石的自由膨胀率大于25%可称为一般性膨胀岩 大于30%则可称为典型膨胀岩。作为隧洞围岩的粉砂质泥岩粘粒含量达33.2% ~34.5% 分散度达96.2% 自由膨胀率为35.0% ~36.0% 由此表明粉砂质泥岩粘粒含量较高 具有较高的分散度和一定的膨胀特性、属膨胀岩。

(3) 粉砂质泥岩的膨胀力与饱和度有一定的关系 随着饱和度的增加而增加 当饱和度达到100%时 其膨胀力最大 P_{max} = 0.292 MPa。

2 隧洞变形破坏特征

2.1 变形破坏特征概述

回龙宫隧洞为升钟灌区的一座输水水工隧洞 全长1155.6 m。隧洞于1987年动工兴建 1992年4月竣工 1994年开始通水。边墙和底板采用浆砌条石衬砌 顶拱大部分为条石衬砌 少部分采用砼衬砌。经2002年汛末检查 顶拱沿浆砌拱石灰缝出现多处开裂 部分拱石剪切破坏 甚至压碎、脱落 边墙

中部出现内鼓现象,多处产生水平裂缝,最宽达 3 cm,已出现多处垮塌,底板浆砌条石向上隆起,隆起最高高达 55 cm,损坏严重,影响了灌区的通水灌溉。

2.2 变形破坏程度分级

据现场勘查,按各段变形破坏的严重程度,对因围岩变形破坏而引起的隧洞衬砌变形破坏分为以下 4 类:

类:衬砌中几乎不见宏观(肉眼可见)性的裂缝,但推测应存在肉眼不易发觉的微裂隙,变形破坏轻微。

类:底板向上隆起,隆起高度 10~20 cm,隆起中部一般有张开 1.0~2.0 cm 的裂缝沿轴向延伸,裂缝大部分追踪条石间的灰缝发育。边墙及顶

拱几乎不见宏观性的裂缝,变形破坏程度一般。

类:底板隆起高度增大到 24~55 cm,隆起部位处砂浆与条石已脱开,裂缝宽度 2.0~3.0 cm,大者 4.0~5.0 cm。左、右边墙向内侧鼓出,偏离边墙垂线 12.0~15.0 cm,并在 1.0~1.3 m 高处形成裂缝,一般追踪砂浆延伸,同时部分边墙还见有条石被拉裂、剪断的现象,变形破坏程度较严重。

类:底板、边墙破坏情况与类基本相当,但条石被拉裂、剪断的现象较多些。且见有边墙衬砌垮塌的现象。顶拱拱石被压碎、拉裂,顶拱的整体性不同程度地遭到破坏,失去了拱的作用,变形破坏程度严重。

隧洞围岩变形破坏的分段情况见表 5。

表 5 隧洞围岩变形破坏分段情况一览表

Table 5 The tunnel circum jacent rock deformation and failure segmental catalog

分段桩号	0+000~0+25	0+250~0+31	0+314~0+58	0+588~0+87	0+871.5~1+0	1+071~1+15
破坏类别						
破坏程度评价	轻微	一般	较严重	严重	较严重	轻微

表 5 表明,破坏严重的段次(类)位于隧洞的中部,由此向进、出口两个方向破坏程度为较严重(类)、一般(类)、轻微(类)。现场勘察可以看出隧洞衬砌的变形破坏顺序如下:首先是底板中开裂并向上鼓起,其次是边墙中部的开裂并出现内鼓,最后导致拱座失去支撑而顶拱开裂。

3 隧洞衬砌变形破坏机理分析

一般地讲,围岩变形破坏主要是由于围岩岩体中存在不利软弱结构面组合导致围岩产生“塌落围岩变形”或由于初始地应力较高,围岩强度较低,隧洞开挖后二次围岩应力超过岩石强度从而产生“形变围岩变形”。为进行隧洞的衬砌变形整治,首先要分析其变形破坏的机理。对于回龙宫隧洞围岩破坏的原因初步分析有以下几点值得注意:由于隧洞位于构造活动较弱的四川盆地,其地应力水平较低,因此,可以排除由于高地应力导致的较高二次围岩应力而致使隧洞衬砌破坏的可能;由前所述,隧洞粉砂质泥岩具有膨胀岩的特点,其自由膨胀率为 35.0%~36.0%,最大膨胀力 $P_{max} = 0.292 \text{ MPa}$ 。因此,笔者认为隧洞围岩变形破坏应与围岩的膨胀有关。

3.1 围岩膨胀机制

由于作为隧洞围岩的粉砂质泥岩其粘土矿物成

分以伊利石($K < 1 \text{ Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$)为主,它对水具有较强的吸附作用。这类岩石的膨胀力主要来源于岩石中孔隙与裂隙对水的吸附产生的“楔裂压力”^[5]。取粉砂质泥岩作崩解试验,当岩块试样置于水中后,可以看到试样开始出现大小不等的裂隙,然后随着裂隙的发展崩解成大小不同的碎块,这种碎块往往难以进一步分散,浸泡的水也常常是清澈的。我们称这类崩解为“楔裂性崩解”。这与含蒙脱石为主的粘土岩浸水后开始吸水膨胀并有鳞片状碎屑物崩落、分散使浸泡水发生浑浊的机理是不同的,这类岩石的崩解可称作“分散型或膨胀型崩解”^[5]。

我们知道,隧洞围岩中存在孔隙与裂隙。孔隙形成于成岩过程中,而裂隙则有两种:岩石中原有构造、风化裂隙,施工开挖过程中的爆破裂隙与松弛圈内的松弛裂隙。据试验资料组成隧洞粉砂质泥岩的孔隙率(包括孔隙和第一类裂隙)为 14.0%,这是比较高的,这其中还尚不包括第二类裂隙。

粉砂质泥岩中的孔隙与裂隙表面是其岩石结构体系中的“水—岩界面”的主要部分,它具有较大的表面能,与水接触时能强烈地吸附水分子。吸附将使其表面能减小,减小的表面能一部分以湿润热的形式逸散,另一部分则转化为促使岩石“水—岩界面”增大的力学破坏能,即前述“楔裂压力”,

“水—岩相界面”的增大必将导致岩石体积的膨胀和崩解,以及由此产生的膨胀力,这就是该类岩石的膨胀机制。

3.2 膨胀力及其对隧洞围岩变形破坏的影响

试验测试成果已经表明,回龙宫隧洞紫红色粉砂质泥岩的自由膨胀率为35.0%~36.0%。膨胀力大小随着含水量增大而增大相关。最大膨胀力 $P_{max}=0.292$ MPa。据有关资料:岩石的最大膨胀力与环境湿度的变化密切相关,Hvang等通过侧向约束实验得出了最大膨胀力与相对湿度 RH 及湿度变化指数 I_{RH} 的关系模型^[6]:

$$P_{max} = 0.0686RH - 0.008RH^2 + 1.473I_{RH} + 0.0132I_{RH}^2 - 0.0145RH \times I_{RH} + 0.9594$$

式中 P_{max} 为最大膨胀压力,单位MPa。

上式表明,最大膨胀压力与湿度变化指数 I_{RH} 呈平方变化关系,膨胀压力对湿度的变化是十分敏感的。

回龙宫隧洞为一灌溉输水隧洞,其运行方式为每年3~8月份隧洞输水,9月至第二年2月底隧洞则停止运行。在输水期间,还有按灌溉需要的不同时段甚至每日的输水、停水变化。这种输水、停水的变化将导致隧洞运行过程产生较频繁的干、湿循环,这无疑将产生较大的湿度变化,使粉砂质泥岩达到其最大膨胀力,从而导致围岩的变形与破坏。由于岩石在干、湿循环作用下的膨胀与收缩是一个可逆过程,反复的干湿循环导致了围岩的反复膨胀与收缩,相当于给隧洞衬砌的反复加荷与卸荷,这也是导致围岩变形破坏的另一原因。

3.3 隧洞围岩的膨胀变形破坏机制

隧洞衬砌材料为100#浆砌条石,一般地讲砂浆与条石的热胀特性是不同的。环境温度与湿度的变化,将首先导致沿砂浆与条石的薄弱部分产生裂纹。隧洞水正是从这种裂纹首先渗入到衬砌背后的围岩孔隙与裂隙中,由此为岩石的膨胀提供了外部条件,而岩石的膨胀力反作用于衬砌上使得条石砂浆间的裂纹进一步扩展。这样水的入渗与围岩的膨胀作用就形成了一种逐渐放大的耦合作用,直至导致衬砌的开裂与破坏。另外,隧洞埋深较大,一般为60~100 m,中部达170 m,围岩自重应力较大,而组成隧洞围岩的粉砂质泥岩湿抗压强度为14.8 MPa,软化系数0.45,属软岩。软岩围岩在较大自重应力下必然产生蠕变变形。岩石的膨胀变形与蠕变变形的相互叠加又形成了一种逐渐放大的耦合作用。这也是导致隧洞衬砌变形破坏的另一种作用。

3.4 围岩变形破坏的数值分析

为论证前述红层软岩膨胀导致隧洞围岩变形破坏机制,建立了相应的计算模型。建模时选取隧洞变形破坏严重的地段(桩号0+588~0+871.5)进行有限元分析。隧洞大小按设计尺寸给定,计算中考虑了洞室开挖后的围岩松弛影响,松弛厚度按相关工程类比确定。根据隧洞所处的地质环境,计算时按自重应力场进行分析。

有限元数值计算结果如下:在天然自重应力场下,隧洞围岩变形较大的部位出现在边墙及顶拱一带,洞周最大位移为14~15 cm,底板上相对较小,为12 cm(图2)。考虑围岩的软化、膨胀作用,膨胀力取0.292 MPa(1.0 m范围内岩体饱和度为100%)隧洞围岩的变形增大较明显,且以底板中心处位移量为最大,达20 cm以上,其次在边墙腰部位移量为18 cm,并以隧洞底板轴线处的位移增量为最大,达8 cm(图3)。由此表明,考虑围岩软化、膨胀作用下计算围岩位移与实际现场观测到的各部位变形量值及隧洞围岩变形破坏顺序基本一致,从而说明隧洞围岩变形破坏的主要是岩石遇水膨胀导致的。

4 结论和建议

据上述围岩膨胀导致产生变形破坏的机理,对在红层软岩中设计施工水工隧洞提出以下几点建议,以作为在类似工程防止围岩变形破坏的参考。

(1) 施工开挖过程中应及时封闭衬砌,以减轻或避免围岩的风化、风干,特别围岩是湿度条件及含

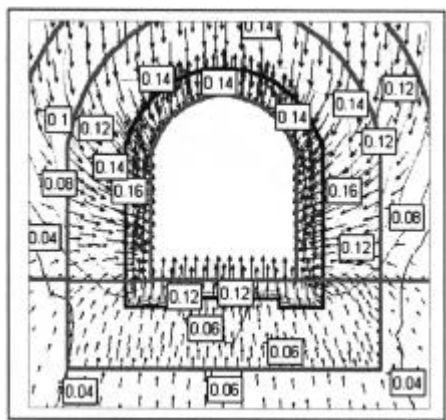


图2 自重应力场下的为位移矢量图

Fig 2 The graph of displacement and vector of gravity stress field

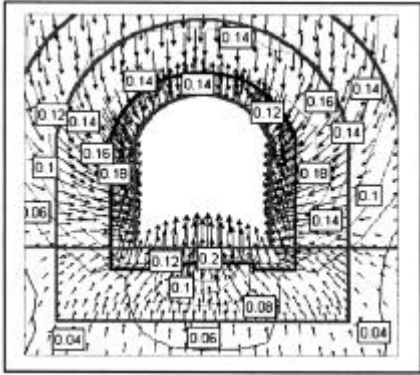


图 3 自重应力与膨胀力场下的为位移矢量图

Fig 3 The graph of displacement and vector of gravity and swelling stress field

水量的变化。施工方法应采用浅眼多循环开挖方案, 优先选用光面爆破坏。施工时应处理好地下水的引排, 尽量减少对围岩的浸泡。

(2) 施工过程中对超挖部分的回填应选用块(卵)石混凝土或浆砌块石等非膨胀材料, 禁止使用膨胀岩围岩的母岩石渣, 因为这种材料的比表面积较母岩大, 其膨胀潜势也较母岩大, 对隧洞衬砌的变

形破坏作用也更大。

(3) 隧洞衬砌破坏首先发源于底板的隆起开裂, 因此, 施工时首先对底板岩石砂浆进行封闭是十分必要的, 必要时可再增加适当锚固措施, 以防止底板围岩的遇水膨胀。

(4) 衬砌的断面型式应选用马蹄形或圆形等以适应围岩膨胀变形。衬砌材料不宜使用两种以上的热胀性能有一定差异的材料(如浆砌条石等) 应优先考虑钢筋混凝土等单一的整体性较好的材料, 以避免应温度与湿度变化而使不同材料间产生裂纹。

参考文献(References):

- [1] 孔德坊. 全国首届膨胀土科学研讨会论文集序言[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1990.
- [2] 刘洪特, 林天健. 软岩工程设计理论与工程实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 喻亦林. 工程地质勘察规范与强制性条文实施手册[M]. 北京: 光明日报出版社, 2001.
- [5] 周思孟. 复杂岩体若干岩石力学问题[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [6] 杨庆, 吴训川. 膨胀岩工程性能研究线状[J]. 勘察科学技术, 1993, 12.

STUDY ON MECHANICS OF DEFORMATION AND FAILURE OF THE RED - BED SOFT HYDRAULIC TUNNEL'S SURROUNDING ROCK

WANG Zi-Zhong^{1, 2}

(1. National Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection in Chengdu University of Technology, Chengdu 6100592, China; 2. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu 611731, China)

Abstract: The properties of red-bed soft rock have been systematically researched both domestically and abroad, these properties include the material constitution, chemical ingredient and physical-mechanical property. But engineer and technician pay more attention to the mechanics of deformation and failure as well as the treatment to such deformation and failure. Based on the geological environment analysis and finite element numerical calculation of the HuLongGong tunnel, this paper explains the mechanics of deforming failure result from the swelling of the red-bed soft tunnels surrounding rock. Finally recommendations for preventing deforming failure of such hydraulic tunnel are presented in this paper.

Key word: Red-bed soft rock; Hydraulic tunnel; Mechanics of deformation and failure of surrounding rock.