

亭子口灌区一期工程Ⅲ标段隧洞围岩膨胀性分析

王广巍, 于晓飞, 乔有浩, 石瑶

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要:亭子口灌区一期工程Ⅲ标段布置有隧洞、渡槽、明渠等建筑物,共计布置了 25 座隧洞,总长度约为 41.8 km,隧洞围岩类别以Ⅳ、Ⅴ类占比高,总体质量较差。隧洞围岩主要为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层。其中粉砂质泥岩、泥质粉砂岩具有透水性弱、亲水性强、遇水膨胀、失水收缩干裂等特性。阐述了对围岩膨胀特性进行的研究与分析,通过试验确定了围岩自由膨胀率、饱和吸水率、膨胀力等膨胀参数,为确定隧洞初期支护及后期钢筋混凝土衬砌厚度、钢筋配筋等提供了设计依据。

关键词:亭子口灌区;隧洞围岩;自由膨胀率;饱和吸水率;膨胀力;膨胀岩

中图分类号:[TV91];TV76;[TV221.2];TV223.1 **文献标志码:** B

文章编号:1001-2184(2024)02-0047-05

Analysis on the Swellability of Surrounding Rock of the Tunnel in the Bid Ⅲ of Tingzikou Irrigation Area Fase I

WANG Guangwei, YU Xiaofei, QIAO Youhao, SHI Yao

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 611130)

Abstract: The Bid Ⅲ of Tingzikou Irrigation Area Fase I Project is equipped with tunnels, aqueducts, open channels and other buildings. There are 25 tunnels, with a total length of about 41.8 km, and the surrounding rock of the tunnel has a high proportion of class Ⅳ and Ⅴ, and the overall quality is poor. The surrounding rock of the tunnel is mainly composed of silty mudstone and mudstone siltstone interlayer with different thickness. Among them, silty mudstone and argillaceous siltstone have the characteristics of weak permeability, strong hydrophilicity, water expansion, water loss shrinkage and dry cracking. In this paper, the expansion characteristics of surrounding rock are analyzed, and the expansion parameters of surrounding rock such as free expansion rate, saturated water absorption rate and expansion force are determined through tests, which provides design basis for determining the thickness of the initial support and the reinforced concrete lining and reinforcement of the tunnel.

Keywords: Tingzikou Irrigation Area; Surrounding rock of tunnel; Free expansion rate; Saturated water absorption; Expansive force; Swelling rock

1 概述

亭子口灌区工程是四川省内陆地区大(1)型水利工程,其主要功能为灌溉和城乡供水,是造福川东北地区重要的民生工程。亭子口灌区工程包括总干渠、东干渠、西干渠几部分,其中总干渠从已建成的亭子口水利枢纽左岸隧洞取水,全长 144.57 km,取水口处的设计流量为 76.2 m³/s;东、西干渠从总干渠末端分水,东干渠全长 62.22 km,西干渠全长 58.24 km。

亭子口灌区工程分两期实施,笔者所述项目为亭子口灌区一期工程Ⅲ标段,主要位于南充市营山县、蓬安县境内,总干渠桩号为 K106+650.00~K144+573.31,共计长度为 37.923 km。起始

桩号设计流量为 51.25 m³/s,终止桩号设计流量为 41.2 m³/s。亭子口灌区一期工程Ⅲ标段总干渠布置有金鸡梁隧洞、黄岭垭隧洞、小寨子隧洞、火山梁隧洞等 12 座隧洞,最长的小寨子隧洞长度达 9145 m;断面呈圆形,衬砌后洞径为 5.9~6.4 m,设计流量为 41.2~51.25 m³/s。在西干渠布置有狮子岩隧洞、李家沟隧洞等 7 座隧洞,其断面呈城门洞型,尺寸为 3.45 m×4.4 m(宽×高);回龙水库提灌充水渠布置有芭茅沱隧洞、文子垭口隧洞等 6 座隧洞,断面呈城门洞型,尺寸为 2.6 m×3.0 m(宽×高)。

2 隧洞围岩的工程地质条件

综上所述,亭子口灌区一期工程Ⅲ标段共计

布置有 25 座隧洞,总长度约为 41.8 km,其垂直埋深一般为 100~200 m。隧洞穿越地层主要为侏罗系遂宁组(J_{3s})粉砂质泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层。围岩分类采用《水利水电工程地质勘察规范》GB 50487—2008(2022 年版)^[1]中的工程地质分类标准,以岩石强度、岩体完整程度、结构面状态为基础,综合考虑主要结构面产状及其与洞轴线的组合关系、地下水、围岩强度应力比等因素影响,对隧洞围岩进行了详细分类,得出隧洞围岩Ⅳ、Ⅴ类占比高、总体质量较差的结论。

总体而言,隧洞围岩呈弱风化~新鲜,岩石强度均不高,且以软岩、较软岩为主;弱风化、新鲜粉砂质泥岩的饱和抗压强度平均值分别为 7.0~7.5 MPa、11.8~15.9 MPa,属于软岩、较软岩;弱风化~新鲜泥质粉砂岩的饱和抗压强度平均值分别为 10.6~20.5 MPa、18.4~25.1 MPa,属于软岩、较软岩。

隧洞围岩抗风化能力较弱。地质勘探揭示出的岩体强、弱风化水平深度分别为 5.0~10.0 m、12.0~20.0 m。

隧洞围岩构造简单,岩层平缓,产状为 N30°~80°W SW∠1°~4°,主要发育两组构造裂隙:① N70°E NW∠70°~80°,延伸长度为 1.0~3.0 m,间距 0.5~1.5 m,起伏、粗糙;② N10°W NE∠65°~70°,延伸长度为 1.0~4.0 m,间距 0.3~0.8 m,起伏、粗糙;随机裂隙少量分布;局部洞段分布有顺层挤压错动带,其宽度一般为 10.0~30.0 cm,主要由碎裂岩、角砾岩组成,挤压紧密。

区内地下水主要为基岩裂隙水,接受大气降水、地表水补给,局部洞段开挖初期可见顶拱渗、滴水,随着开挖的深入地下水逐渐消失。地表水、地下水的水化学类型均为重碳酸钙型水,对混凝土具有微腐蚀性,对钢筋混凝土结构中的钢筋亦具有微腐蚀性。

工程区处于相对稳定的四川盆地内,第四纪以来新构造运动以整体性、间歇性的微弱隆升为主,差异活动不甚显著,为相对稳定的地区。根据《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015^[2],工程区基本地震动峰值加速度为 0.05 g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,地震基本烈度为Ⅵ度。

根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010(2016 年版)^[3],工程区抗震设防烈度为Ⅵ度,设计地震分组为第一组,区域构造稳定性好。

3 围岩膨胀性研究

3.1 围岩矿化分析

隧洞穿越地层的主要岩性为侏罗系遂宁组(J_{3s})粉砂质泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层。粉砂质泥岩、泥质粉砂岩均具有失水收缩干裂、遇水膨胀(软化)的工程特性。鉴于围岩的膨胀特性与所含黏土矿物种类、含量密切相关,且黏土矿物的主要化学成分为硅酸盐,具有亲水性,吸水膨胀、失水收缩的特性;常见的黏土矿物有蒙脱石、伊利石、高岭石等;其中蒙脱石亲水性最强,伊利石居中,高岭石最弱。为了研究围岩的膨胀特性,笔者进行了试验研究,蒙脱石含量试验成果见表 1。

表 1 蒙脱石含量试验成果表

试验编号	取样地点	样品名称	样品形状	MBI 吸蓝量 g/100 g	蒙脱石 /%
Y01	金鸡梁 支洞工区	泥质 粉砂岩	柱状	2.03	4.59
Y05	金鸡梁 支洞工区	泥质 粉砂岩	柱状	0.40	0.90
Y07	马头坎 隧洞	泥质 粉砂岩	柱状	0.64	1.45
Y10		泥质 粉砂岩	柱状	2.33	5.27
Y11	黄岭垭 隧洞 掌子面	泥质 粉砂岩	柱状	1.20	2.71
Y12		泥质 粉砂岩	柱状	1.66	3.76

根据《中国煤矿软岩巷道支护理论与实践》(中国矿业大学出版社,1996,P20)^[4],何满潮提出的膨胀性软岩分级标准见表 2。

表 2 膨胀性软岩分级标准表

岩体类别	蒙脱石含量 /%	干燥饱和 吸水率 /%	自由膨胀变形量 /%
弱膨胀性软岩	<10	<20	<10
中膨胀性软岩	10~30	20~50	10~15
强膨胀性软岩	>30	>50	>15

蒙脱石含量试验取得的成果表明:岩石中的蒙脱石含量一般为 0.9%~5.27%,远小于 10%。笔者结合饱和吸水率、自由膨胀变形量等因素进行了综合分析,得出隧洞围岩膨胀性较弱的结论。

3.2 围岩崩解特性分析

粉砂质泥岩、泥质粉砂岩具有失水收缩干裂、

遇水膨胀(软化)的工程特性,岩石中的黏土矿物吸水具有膨胀性,且岩石的膨胀性与崩解性相关,岩石浸入水中崩解强烈则围岩膨胀性强。膨胀岩崩解特征分类情况见表 3。

表 3 膨胀岩崩解特征分类表

岩石类别	崩解特征及重量变化
强膨胀岩	泡水后即刻剧烈崩解呈土状散落,水浑浊,10 min 可崩解 50%,20~30 min 崩解完毕
中膨胀岩	泡水后 1~2 h 崩解为碎片,部分下落,碎片不能捏成土饼,其重量可增加 30%~50%
弱膨胀岩	泡水后有少量岩屑下落,几小时后岩块开裂呈 0.5~1.0 cm 的碎块或大片,手可以捏碎,重量可增加 10%
非膨胀岩	泡水 24 h 岩块完整、不崩解、重量增加程度小于 10%

泥岩的崩解强度分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级,由大到小依次为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级。Ⅰ级崩解物呈泥状,Ⅱ级崩解物呈碎屑泥及碎块泥,Ⅲ级崩解物呈碎岩片及碎岩块,Ⅳ级崩解物呈整体块状。

表 4 岩石膨胀性试验成果表

试验 编号	取样 地点	岩石名称	饱和吸水率	膨胀压力 P_e	侧向约束膨胀率	轴向自由膨胀率	径向自由膨胀率
			/ %	/MPa	V_{HP} / %	V_H / %	V_D / %
			平均值	平均值	平均值	平均值	平均值
Y01	金鸡梁支洞	泥质粉砂岩	7.160	0.112	1.607	1.320	1.045
Y02		泥质粉砂岩	4.763	0.039	0.084	0.039	0.021
Y03		泥质粉砂岩	5.430	0.072	0.095	0.067	0.042
Y04		泥质粉砂岩	2.590	0.017	0.029	0.019	0.014
Y05	金鸡梁支洞	泥质粉砂岩	3.860	0.052	0.078	0.054	0.033
Y06		泥质粉砂岩	2.553	0.018	0.029	0.018	0.012
Y07		泥质粉砂岩	5.847	0.062	0.031	0.022	0.014
Y08	马头坎隧洞	泥质粉砂岩	5.213	0.075	0.050	0.033	0.017
Y09		泥质粉砂岩	5.023	0.063	0.041	0.026	0.019
Y10		泥质粉砂岩	7.777	0.179	2.087	1.487	1.183
Y11	黄岭垭隧洞	泥质粉砂岩	6.277	0.093	0.927	0.864	0.551
Y12		泥质粉砂岩	6.717	0.120	1.350	1.098	0.864
SYS-1	栗家庙渡槽	粉砂质泥岩	8.820	0.006	24.000	22.000(自由膨胀率， 易崩解岩石)	
TYS-2	桐子坝渡槽	粉砂质泥岩	13.160	0.000	2.000	15.000(自由膨胀率， 易崩解岩石)	

根据试验成果可以看出:不易崩解的岩石其轴向自由膨胀率 V_H 、径向自由膨胀率 V_D 均小于3%;易崩解岩石的自由膨胀率 F_s 均小于30%;膨胀力一般为17~93 kPa,仅个别试验值大于100 kPa;饱和吸水率 W_{sa} 一般为4.8%~8.8%,仅

为了研究围岩崩解的特性,在钻孔中取14组粉砂质泥岩进行了室内崩解试验,试验成果表明:粉砂质泥岩浸入水中呈块状崩裂坍塌或片状开裂或不发生崩解破坏,且发生崩解的样品全部崩解完毕需时约1至数小时,崩解物为碎岩片或碎岩块,崩解分类以Ⅲ~Ⅳ类为主,浸水后崩解特征不显著。根据《铁路工程岩土分类标准》TB 10077—2019^[5]中的膨胀岩崩解特征分类表(表3),初步判定隧洞围岩具有弱膨胀性。

3.3 围岩膨胀性分析

隧洞围岩主要为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层。为了研究围岩膨胀的特性,划分出围岩膨胀的类别,取岩石进行了自由膨胀率、膨胀力、饱和吸水率室内膨胀试验。岩石膨胀性试验成果见表4。根据《铁路工程岩土分类标准》TB 10077—2019,膨胀岩室内试验判定指标见表5,膨胀岩膨胀性试验指标分类情况见表6。

个别试验值大于10%。根据《铁路工程岩土分类标准》TB 10077—2019中的膨胀岩室内试验判定指标,工程区隧洞围岩为非膨胀岩。

经对隧洞围岩中的蒙脱石含量、崩解特性及自由膨胀率、饱和吸水率、膨胀力等膨胀参数进行

表 5 膨胀岩室内试验判定指标表

岩石类别	试验项目	判定指标
不易崩解 岩石	自由膨胀率 $V_H/\%$ 或 $V_D/\%$	$V_H(\%)$ 或 $V_D(\%) \geq 3$
	自由膨胀率 $F_S/\%$	$F_S \geq 30$
易崩解 岩石	膨胀力 P_P/kPa	$P_P \geq 100$
	饱和吸水率 W_{Sa}	$W_{Sa}/\% \geq 10$

注:(1)对于不易崩解的岩石,应取轴向 V_H 或径向 V_D 自由膨胀率中的大值进行判定;

(2)当有 2 项及以上参数符合表中所列指标时,在室内可以判定为膨胀岩。

表 6 膨胀岩膨胀性试验指标分类表

岩石 类别	膨胀率 $V_H/\%$	膨胀力 P_P/kPa	饱和吸水率 W_{Sa}	自由膨胀率 $F_S/\%$
非膨胀岩	<3	<100	<10	<30
弱膨胀岩	$3 \sim 15$	$100 \sim 300$	$10 \sim 30$	$30 \sim 50$
中膨胀岩	$15 \sim 30$	$300 \sim 500$	$30 \sim 50$	$50 \sim 70$
强膨胀岩	>30	>500	>50	>70

综合分析得知隧洞围岩为非膨胀岩,但其围岩具有一定的膨胀性。因此,在隧洞围岩初期支护及后期钢筋混凝土衬砌支护中,应对围岩膨胀特性予以关注。

4 围岩支护设计

隧洞支护对隧洞施工及运行安全、工程投资具有非常重要的作用,因此,膨胀力的取值对隧洞的结构设计至关重要。根据室内岩石膨胀性试验成果并考虑隧洞围岩的地质条件,特别是地下水储存、补给、排泄条件、钢筋混凝土衬砌回填灌浆压力、围岩固结灌浆压力等因素并参考类似工程经验,对其围岩膨胀力一般按 70~100 kPa 取值。经结构内力和配筋计算进行的围岩支护设计如下:

(1)初期支护。Ⅲ类围岩段:锚杆 $\Phi 22$ 、 $L=3.0$ m,间排距为 1.5 m,钢筋网 $\Phi 6.5$,间排距为 20 cm $\times$ 20 cm。Ⅳ类围岩段:锚杆 $\Phi 25$ 、 $L=4.5$ m,间排距为 1.25 m,锚杆 $\Phi 22$ 、 $L=3.0$ m,间排距为 1.25 m,钢筋网 $\Phi 6.5$,间排距为 20 cm $\times$ 20 cm;对于极高地应力、部分高地应力洞段布置钢拱架 I14 型,间距为 1.0~1.25 m。Ⅴ类围岩段:锚杆 $\Phi 25$ 、 $L=4.5$ m,间排距为 1.0 m,锚杆 $\Phi 22$ 、 $L=3.0$ m,间排距为 1.0 m,钢筋网 $\Phi 6.5$,间排距为 20 cm $\times$ 20 cm;钢拱架 I18 型,间距为 1.0 m 或

钢拱架 I14 型,间距为 1.0~1.25 m。

(2)衬砌支护。Ⅲ类围岩段:C25 钢筋混凝土厚 30 cm,单层钢筋;Ⅳ类围岩段:C25 钢筋混凝土厚 40 cm,双层钢筋;Ⅴ类围岩段:C25 钢筋混凝土厚 50 cm,双层钢筋;钢筋混凝土衬砌,回填灌浆压力采用 0.2 MPa;顶拱布置 $\Phi 5$ cm,深度为 3 m,排距为 2 m 的排水孔;Ⅴ类围岩段根据开挖揭示的围岩地质条件进行固结灌浆。

5 围岩变形监测

为了掌握隧洞围岩的变形情况,按照《水利水电工程安全监测设计规范》SL 725—2016^[6]要求,在工程区隧洞内布置了监测断面,对隧洞围岩的变形情况进行监测。隧洞围岩属于软质岩且以塑性变形为主,各隧洞围岩进行初期支护后的监测成果显示:监测初期围岩变形速率较大,顶拱垂直变形可达 10 cm,在约 1.5~2 个月后围岩变形曲线基本趋于平缓,围岩变形趋于收敛。马头坎、黄岭垭、大深沟等隧洞衬砌支护完成后,现场巡视未见衬砌有变形、开裂等破坏现象出现,隧洞围岩、衬砌稳定。工程后期继续对隧洞围岩、衬砌进行监测、巡视,出现异常情况时及时进行处理。

工程区内的隧洞均为无压引水洞,当粉砂质泥岩、泥质粉砂岩的湿度条件、含水率发生变化时易产生胀缩现象,一般会发生顶拱、边墙膨胀开裂。因此,施工时应及时封闭围岩、衬砌成洞,尽量避免围岩出现干、湿交替条件变化。为保证围岩地下水排泄通畅,在隧洞顶拱布置了 $\Phi 5$ cm,深度为 3 m,排距为 2 m 的排水孔。

6 结 语

(1)亭子口灌区一期工程Ⅲ标段布置有 25 座隧洞,总长度约为 41.8 km,隧洞围岩以Ⅳ、Ⅴ类岩体占比高,总体质量较差。

(2)隧洞穿越的地层主要为遂宁组(J_{3s})粉砂质泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层。粉砂质泥岩、泥质粉砂岩具有失水收缩干裂、遇水膨胀(软化)的工程特性。

(3)粉砂质泥岩浸入水中呈块状崩裂坍塌或片状开裂或不发生崩解破坏。发生崩解的岩石样品全部崩解完毕需 1 至数小时,崩解物为碎岩片或碎岩块,崩解分级以Ⅲ~Ⅳ类为主,浸水后的崩

解特征不显著。

(4)经对隧洞围岩中的蒙脱石含量、崩解特性及自由膨胀率、饱和吸水率、膨胀力等膨胀参数进行综合分析后,得出隧洞围岩为非膨胀岩的结论,但其围岩具有一定的膨胀性。根据室内岩石膨胀性试验取得的成果,同时考虑隧洞围岩地质条件,特别是地下水储存、补给与排泄的条件,钢筋混凝土衬砌回填灌浆压力、围岩固结灌浆压力等因素,对于围岩膨胀力一般按 70~100 kPa 取值。

(5)各隧洞围岩初期支护后进行的监测成果显示:监测初期围岩变形速率较大,顶拱垂直变形量可达 10 cm,经过约 1.5~2 个月后围岩变形曲线基本趋于平缓,围岩变形趋于收敛。在马头坎、黄岭垭、大深沟等隧洞衬砌支护完成后的现场巡视过程,未见衬砌出现变形、开裂等破坏现象,隧洞围岩与衬砌稳定。

(6)粉砂质泥岩、泥质粉砂岩在围岩湿度条件、含水率发生变化时易产生胀缩现象,一般表



(上接第 46 页)

4 结 语

PC 连续刚构渡槽采用箱型截面,在箱梁内部输水的同时其可兼做承载结构,能够满足大型引水工程大跨度、大流量的要求。笔者通过使用不同的规范进行验算并取得了相应的结论,旨在为后续大跨度连续刚构渡槽的设计提供借鉴及参考。具体结论为:

(1)从上部结构承载力状态角度进行验算取得的结果可知:公路规范比水工规范更加严格。因此,对于连续刚构渡槽类水工构筑物而言,其需要同时满足公路规范和水工规范。

(2)从上部结构正常使用极限状态角度进行验算取得的结果可知:水工规范比公路规范更加严格。因此,对于连续刚构渡槽类水工构筑物而言,其需要首先满足水工规范,然后再按照公路规范进行补充。

(3)从上部结构正常使用极限状态角度进行验算取得的结果可知:进行结构纵向验算时,公路与水工规范都应按照全预应力构件进行验算。

现为顶拱、边墙膨胀开裂。因此,施工中应及时封闭围岩、衬砌成洞,尽量避免围岩干、湿交替条件变化。

参考文献:

[1] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487-2008[S].
[2] 中国地震动参数区划图:GB 18306-2015[S].
[3] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].
[4] 何满潮.中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M].江苏苏州:中国矿业大学出版社,1996.
[5] 铁路工程岩土分类标准:TB 10077-2019[S].
[6] 水利水电工程安全监测设计规范:SL 725-2016[S].

作者简介:

王广巍(1971-),男,内蒙古赤峰人,副高级工程师,学士,从事水利水电工程地质勘察工作;
于晓飞(1991-),男,河北沧州人,工程师,硕士,从事水利工程设计工作;
乔有浩(1991-),男,山东菏泽人,工程师,硕士,从事水利水电工程地质勘察工作;
石 瑶(1991-),男,陕西宝鸡人,工程师,硕士,从事桥涵设计工作.

(编辑:李燕辉)

参考文献:

[1] 王百阳.岩基上大跨度梁式渡槽有限元数值模拟分析[D].长春:吉林大学,2017.
[2] 徐江,向国兴,罗代明,等.连续刚构结构在特大跨径渡槽建设中的创新与实践[J].水利水电技术,2017,48(1):82-87.
[3] 向国兴,徐江,罗亚松,等.高墩大跨度连续刚构渡槽技术指南[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
[4] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].
[5] 水工混凝土结构设计规范:SL 191-2008[S].
[6] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362-2018[S].

作者简介:

石 瑶(1991-),男,陕西宝鸡人,工程师,硕士,从事桥涵设计工作;
高立宝(1979-),男,四川成都人,正高级工程师,学士,从事桥梁设计工作;
陈 强(1994-),男,四川成都人,工程师,硕士,从事桥涵设计工作;
代 富(1989-),男,四川成都人,副高级工程师,学士,从事桥涵设计工作;
王广巍(1971-),男,内蒙古赤峰人,副高级工程师,学士,从事水利水电工程地质勘察工作.

(编辑:李燕辉)