

四川盆地丘陵区冬水田段水利工程渠道结构型式探究 ——以毗河供水一期工程为例

董劲¹, 苏春², 窦攀²

(1. 四川省水利规划研究院, 四川 成都 610072; 2. 四川水发勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:四川盆地丘陵区冬水田占比较大,冬水田为黏土层,属高液限黏土,土质一般呈饱和状态,透水性微弱,具有弱膨胀性和高压缩性,抗剪强度极低,渠道边坡无法自稳及基础承载力低为其主要的工程特点。以毗河供水一期工程为例,对该地层渠道进行了边坡稳定计算,并分析了边坡的破坏形式。根据稳定计算结果,提出了水利工程渠道结构型式及基础处理方式。该文可为四川盆地丘陵区冬水田段水利工程渠道设计提供参考。

关键词:毗河供水一期;高液限黏土;冬水田;渠道设计;基础处理

中图分类号:[TV91];TV732.6

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)04-0075-04

Exploration of the Structural Forms of Water Conservancy Engineering Channels in Winter Paddy Fields in Hilly Areas of the Sichuan Basin ——Taking Phase I of the Pihe River Water Supply Project as an Example

DONG Jin¹, SU Chun², DOU Pan²

(1. Sichuan Provincial Institute of Water Resources Planning and Research, Chengdu Sichuan 610072;

2. Sichuan Water Development Investigation, Design & Research Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: In the hilly areas of the Sichuan Basin, winter paddy fields account for a large proportion. The winter paddy fields are composed of clay layers with high liquid limit, typically in a saturated state with weak permeability. They exhibit weak expansibility, high compressibility, extremely low shear strength, and the inability of the channel slopes to self-stabilize, as well as low foundation bearing capacity, which are the main engineering characteristics. Taking the Pihe River Water Supply Phase I Project as an example, the author conducted stability calculations for the channel in this geological stratum, analyzed the failure modes of the slopes, and proposed structural forms and foundation treatment methods for water conservancy project channels based on the stability calculation results. This paper can serve as a reference for the design of water conservancy engineering channels in the winter paddy fields of the hilly areas in the Sichuan Basin.

Keywords: Phase I of the Pihe River Water Supply; High liquid limit clay; Winter paddy fields; Channel design; Foundation treatment

1 概述

水利工程是强化水旱灾害防治、优化水资源配置、改善水生态环境、促进流域区域协调发展的重要手段,在保障国家水安全中具有不可替代的基础性作用。四川省因地制宜地提出了“五横六纵”引水补水的网络,涉及 19 个市州 104 个县(市、区),设计年供水能力 187 亿 m³,设计灌面 4 600 万亩,供水人口 6 280 万人,采用了重力式输水明渠,且大多穿越四川丘陵区。川中丘陵、川东

平行岭谷相对缺水,因此多修筑堰塘蓄水,水稻收割后,稻田也常蓄水过冬,称为“冬水田”,冬水田在四川盆地丘陵区占有相当大的比例^[1]。由于冬水田黏土常年浸泡在水中,属于高液限黏土,土质呈饱和状态,透水性微弱,具有弱膨胀性和高压缩性,抗剪强度极低^[2]的特点。

笔者以穿越川中盆地丘陵区冬水田段的四川省都江堰灌区毗河供水一期工程渠道为研究对象,进一步探索了冬水田的物理力学特性,揭示了冬水田渠道边坡破坏形式,并进行了稳定计算,优

收稿日期:2024-02-29

化了冬水田段渠道设计,力求为四川盆地丘陵区冬水田段水利工程设计施工提供参考。

2 冬水田段基本地质条件

毗河供水一期工程用水区主要位于龙泉山以东的涪江、沱江之间的广大丘陵区,隶属成都市的金堂、简阳和资阳市的雁江、乐至、安岳及遂宁市的安居、大英等7个县(市、区)。部分渠道多以倒虹管和明(暗)渠型式穿越冬水田、鱼塘和藕田等洼地地段,地形平缓开阔,建基面位于高液限黏土层,地下水埋藏浅,埋深0.7~0.8 m。地表覆盖层为第四系全新统坡洪积黏土,棕色或紫红色,饱和,可塑~软塑状,透水性微弱,切面光滑,附着力强,手按留下清晰完整指印,风干后坚硬等特点。

通过对冬水田段渠基土进行取样,分别进行物理性质、渗透及固结和三轴抗剪强度试验,试验结果表明:①渠基土黏粒含量为35.2~41.6%,液限为50.4~54.1%,塑限为25.8~26.8%,塑性指数IP为24.2~27.3,为高液限黏土(CL);自由膨胀率38~46%,具弱膨胀性;干密度1.28~1.43 g/cm³,含水率34.3~42.0%,液性指数IL=0.33~0.56,可塑状;饱和度100%,呈饱和状态;②渗透系数为3.4×10⁻⁷~4.5×10⁻⁷ cm/s,固结系数C_v为4×10⁻⁴ cm²/s,具微弱透水性;原状样压缩系数a_{v0.1~0.2}=0.742~1.024 MPa⁻¹,压缩系数a_{v0.1~0.2}>0.5 MPa⁻¹,高压缩性;③原状土φ_{CD}=12.9~17.8°,C_{CD}=13.1~22.9 kPa;φ_{CU}=9.8~15.9°,C_{CU}=17.0~26.8 kPa;φ_{UU}=1.0~1.3°,C_{UU}=17.3~25.6 kPa。渠基土呈饱和状态,UU剪强度极低^[3-4]。

3 冬水田段渠道边坡失稳分析

毗河供水一期工程穿越冬水田段部分渠段为梯形明渠,渠道内坡1:1.5,采用8 cm厚C15混凝土衬砌面板防渗。在开挖施工过程中,冬水田段渠道基坑土质边坡开挖后,边坡屡次发生滑塌失稳,地表出现拉裂缝或下陷平台,裂缝宽度3~12 cm,下陷深度5~25 cm,基坑边坡坡脚位置局部出现脱落块体,产生锯齿状裂面,基坑底部表面中间部位见平行开挖轴线的隆起,隆起约高于两侧5~15 cm。

通过综合分析工程地质条件、施工组织等情况,认为边坡失稳主要是自然因素与人为因素相

互作用;①土层属高液限黏土,呈饱和状态,透水性微弱,具弱膨胀性和高压缩性,UU剪强度极低。塑性指数IP为24.2~27.3,塑性指数较大,表明颗粒愈细,比表面积愈大,土的黏粒或亲水矿物含量相应较高,导致土体常处于饱和状态,开挖后土质边坡自稳时间较短。黏土抗剪强度极低,边坡稳定性较差。②施工开挖后,基坑边坡在短时间内处于稳定状态,地下水呈缓慢渗流状出露于边坡表面,在渗透力的破坏下边坡稳定性进一步变差;渗出的地下水在基坑内形成积水,由于黏土透水性微弱,坑底积水无法自排外泄,边坡坡脚在水的浸泡下进一步软化,抗剪强度进一步降低,导致边坡出现滑塌、底板隆起。③开挖后暴露时间长,例如隧洞等建筑物进出口常开挖边坡后作为建筑物施工通道,边坡表面水分流失,土体表面干缩造成无规律裂缝,在干湿交替环境里裂缝向深部发展,若遇降雨天气,雨水渗入,边坡稳定性急剧变差。④基坑开挖后,坡顶常有临时堆载,边坡一侧有施工便道,施工机具运移作业,振动使黏土软化液化,对边坡稳定极为不利。⑤临时截水措施未及时实施,坑外地表水体灌入坑内,基坑内抽排水措施未及时或者排水泵量不足,不能有效降低基坑积水。

根据以上分析,冬水田段渠道边坡失稳主要受到大气环境、降雨入渗、地质特性及地下水位高、施工组织不当等影响,进而表现为开挖导致坡脚应力集中且无保护措施、边坡临时堆载及机械振动作用、大气及地下水作用致使土体抗剪强度降低及降水入渗进而致使土体饱和、施工期边坡暴露时间长边坡干湿交替等多重作用叠加引起局部裂隙扩展蠕变甚至滑坡。

4 冬水田段渠道边坡稳定计算

穿越冬水田段渠道常年地下水位高,且无外排出口,渠道建建后将存在较大的内外水高差,尤其是渠道检修工况下,地下水高于渠道底板,对边坡稳定不利。计算方法选取单一安全系数毕肖普法,计算程序采用理正边坡稳定分析软件,规范采用《水利水电工程边坡设计规范》SL 386-2007,边坡稳定复核计算工况选取两种控制性工况进行设计计算:①施工工况:渠坡开挖完毕,考虑有地下水渗流(水位与坡顶齐平);②正常运行工况:渠内无水,渠堤外坡地下有水(水位与坡顶齐平),堤顶

考虑管理运行车辆荷载 1 t/m²;计算模型选取渠道深度为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 m 的 10 种类型,渠道边坡稳定计算简图见图 1,边坡稳定分析计算参数见表 1^[5]。

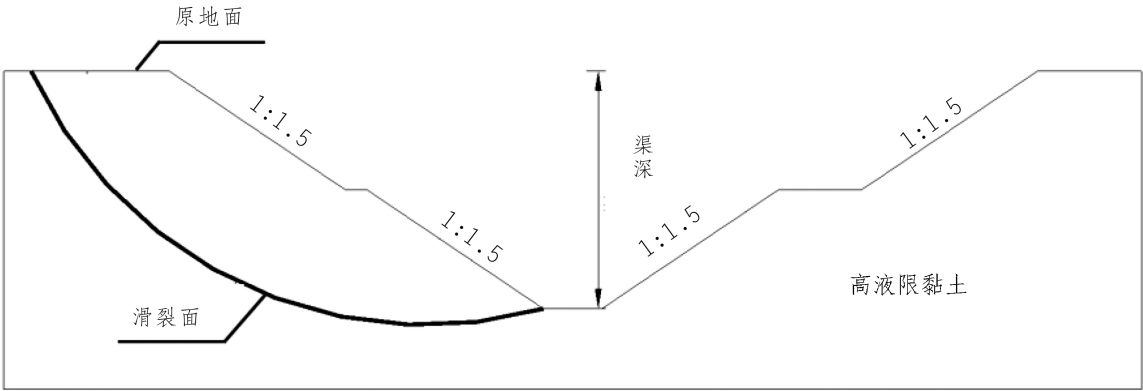


图 1 渠道边坡稳定计算简图

表 1 边坡稳定分析计算参数

土体类型	原状干密度 /(g·cm ⁻³)	饱和状态	压缩系数 a _{v0.1-0.2} /MPa ⁻¹	渗透系数 /(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	抗剪强度		
					强度类型	C /kPa	φ /°
渠基黏土	1.28~1.43	饱和	0.742~1.024	3.4~4.5	CD	5	13.0
					CU	5	11.0
					UU	10~15	0

通过边坡稳定计算,计算成果如表 2。通过计算成果可以得出,当渠道开挖深度≤2.0 m 时,渠道边坡施工期及运行期内抗滑稳定均满足规范要求;当渠道开挖深度 2.0~4.5 m 时,施工期满足规范要求,而运行期不满足规范要求;当渠道开

挖深度≥4.5 m 时,渠道边坡施工期及运行期内抗滑稳定均不满足规范要求。综上所述,冬水田段渠道深度≥2.0 m 时,边坡抗滑稳定安全系数不满足规范要求,穿越冬水田段梯形渠道渠基边坡稳定存在一定安全隐患。

表 2 边坡稳定分析计算成果

计算工况	不同渠道深度条件下的边坡安全系数										允许值
	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m	5.5 m	6.0 m	
施工期 (渠坡开挖完毕)	2.35	2.11	1.83	1.62	1.40	1.23	1.06	0.99	0.93	0.83	[1.05]
正常运行期 (渠内无水)	1.28	1.14	0.97	0.86	0.80	0.73	0.68	0.64	0.60	0.58	[1.15]

5 冬水田段渠道结构型式探究

根据以上对穿越冬水田段地质性状分析,结合渠基土试验结果和边坡垮塌分析及计算,毗河供水一期工程对明渠结构按照填方渠道、半填半挖渠道、挖方渠道区分后,综合考虑渠道施工、边坡稳定及后期维护、外部交叉建筑物布置、工程投资等因素,根据引水流量即渠道结构尺寸不同、渠道埋深深度不同等分段进行了结构设计,目前渠道结构运行情况良好。穿越冬水田段多为灌区工程的用水区,多以分干渠、支渠为主,渠道总体设计流量不大,此文以某设计流量为 2.328 m³/s 分干渠为例进行渠道结构型式探究。

5.1 渠道结构型式及渠基处理

分别拟定了梯形明渠、矩形明渠、城门洞型暗涵和矩形箱涵断面,根据《灌溉与排水工程设计标准》GB 50288-2018,渠道横断面结构尺寸应根据渠道过水面积、设计流量和比降等通过水力计算确定。穿冬水田段渠道按明渠均匀流计算公式计算确定渠道所需的过水断面:

$$Q=\omega C \sqrt{Ri}$$
(1)

式中:Q 为流量,m³/s;ω 为过流面积,m²;C 为谢才系数;R 为水力半径,m;i 为渠道比降。

计算得到的各渠道结构型式的水力要素见表 3。根据不同的渠道结构型式,各渠道结构型式的

渠基处理方式见表4。

5.2 渠道工程经济指标及选用

表3 各渠道结构型式的水力要素

渠道型式	1/底坡	糙率	底宽 /m	直墙高/渠高 /m	半径/坡率 /m	设计水深 /m	设计流量 /(m ³ /s)	加大水深 /m	加大流量 /(m ³ /s)
梯形明渠	4 000	0.015	0.67	1.89	1.5	1.228	2.328	1.350	2.91
矩形明渠	4 000	0.014	2.4	1.7	/	1.206	2.328	1.428	2.91
城门洞型暗渠	4 000	0.014	2.4	1.2	1.2	1.206	2.328	1.43	2.91
矩形箱涵	4 000	0.014	2.4	1.8	/	1.206	2.328	1.428	2.91

表4 各渠道结构型式的渠基处理方式

渠道型式	边界界定	处理方式
梯形明渠	填方	清表后采用块径50~80 cm块石挤淤,振动碾压后石渣填筑
	地面高于底板1 m以内	清基至底板高程,进行块径50~80 cm块石挤淤或者块石换填,振动碾压后采用30 cm石渣找平
	地面高于底板1 m以上	建基面以下30 cm挖除,边坡采用石渣换填水平宽度2.0 m;底板进行块径50~80 cm块石挤淤或者块石换填,振动碾压后采用30 cm石渣找平
填方矩形明渠	/	清表后采用块石挤淤,振动碾压后石渣填筑,顶部采用30 cm石渣找平。
挖方矩形明渠、暗渠、箱涵	/	建基面以下1.1 m挖除后,采用块径50~80 cm块石挤淤,采用振动碾压后,上部采用块径10~50 cm砂岩石渣料换填80 cm,顶部采用30 cm厚C15干拌混凝土找平。

穿冬水田段渠道结构选用宜结合设计流量、地形情况、前后建筑物布置、区域用水情况及交叉建筑物布置等综合考虑。结合现场地形与渠道设计高程的差异,选取典型情况对建筑工程费进行投资对比,见表5。穿越冬水田段渠道一般属于灌区工程的用水区,流量较小。对于填方渠道,采用梯形明渠基础处理范围大,费用高,衬砌面板受地下水位影响容易出现顶托破坏^[5];采用矩形明渠结构,基础处理范围小,费用较梯形明渠结构

低,且矩形明渠结构整体好,建议采用矩形明渠结构。对于浅挖方渠道和地面线高于渠顶1 m的挖方渠道,梯形渠道边坡外侧处理施工困难,且衬砌存在顶托变形风险,建议采用矩形明渠。对于深挖方渠道,当地面高于渠顶2 m及以上时,考虑渠顶以上永久边坡稳定性,不宜采用明渠结构,通过对比矩形箱涵与城门洞型结构,城门洞型结构受力条件较矩形箱涵好,投资相对较小,宜采用城门洞型暗渠结构。

表5 典型情况建筑工程费投资对比 (单位:元)

渠道开挖型式	结构型式	主体建筑工程费			结构型式选择
		渠基处理	主体结构	合计	
填方渠道 (地面线与底板高程齐平)	梯形明渠	2 624	1 238	3 862	费用相当,梯形明渠基础处理费用较高,建议采用矩形明渠
	矩形明渠	1 200	2 563	3 764	
浅挖方渠道 (地面线与渠顶齐平)	梯形明渠	708	1 083	1 792	考虑梯形渠道边坡外侧处理施工困难,且衬砌存在顶托变形风险,建议采用矩形明渠
	矩形明渠	716	2 141	2 857	
	梯形明渠	742	1 248	1 990	
挖方渠道 (地面线高于渠顶1 m)	矩形明渠	716	2 293	3 009	考虑梯形渠道边坡外侧处理施工困难,且衬砌存在顶托变形风险,建议采用矩形明渠
	矩形箱涵	764	3 540	4 304	
	梯形明渠	742	1 453	2 195	
挖方渠道 (地面线高于渠顶2 m)	矩形明渠	716	2 481	3 197	永久边坡高于2 m存在变形风险,城门洞型暗渠较矩形箱涵投资节约,建议采用城门洞型暗渠
	矩形箱涵	764	4 245	5 009	
	城门洞型暗渠	764	4 087	4 851	

6 结 语

笔者通过对四川盆地丘陵区穿越冬水田段渠

基土进行取样试验并对其进行边坡稳定性分析, (下转第85页)

高程的分布符合一般规律。各工况下,心墙各接缝的顺河向剪切、沉陷和拉压扰动变形极值均在 5 mm 以内,这个数值小于止水片的通常变形极值量,因此各接缝止水结构均能适应过坝段鱼道的变形,发挥正常的防渗作用。在施工完成后加强坝后渗漏监测,检验施工质量。

心墙开槽后、鱼道施工完成以及水库重新蓄水均会对⑤号混凝土心墙的应力状态产生影响。心墙开槽前,心墙大、小主应力极值分别为 0.730 MPa 和-0.100 MPa,由于⑤号心墙段墙高较小,心墙整体的小主应力较小,极值为-0.100 MPa。心墙开槽后,变形回弹使心墙的大主应力极值减小,小主应力极值增加,大、小主应力极值分别为 0.516 MPa 和-0.431 MPa,鱼道施工完建期(GK1)心墙的大、小主应力极值分别为 1.009 MPa 和-0.300 MPa。正常蓄水位工况(GK2)心墙大、小主应力极值分别为 1.757 MPa 和-0.986 MPa。各项计算数据表明,大、小主应力均符合混凝土规范要求,满足设计要求。

参考文献:

[1] ANSYS, Inc. ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS 7.0 HTML Online Documentation, 2002.

(上接第 78 页)

结合现场实际施工情况,分析了边坡垮塌的主要原因,选取典型穿越冬水田段渠道进行结构设计并比较了建筑工程费及各种渠道结构的选用型式,为穿越冬水田段渠道结构设计提供参考。

(1)四川盆地丘陵区穿越冬水田段渠道多为用水区,渠道断面较小,分部比较分散,渠基土属高液限黏土,土质呈饱和状态,透水性微弱,具有弱膨胀性和高压缩性,抗剪强度极低。

(2)穿越冬水田段建筑物边坡受自然因素和施工组织等人为因素交叉影响,边坡稳定性分析结果表明:冬水田段渠道深度 ≥ 2.0 m 时,边坡抗滑稳定安全系数不满足规范要求,穿越冬水田段梯形渠道渠基边坡稳定存在一定安全隐患。

(3)在渠道结构布置上,梯形明渠结构整体性差,基础处理费用高,面板容易受外水顶托产生破裂。通过工程投资对比,建议在填方及浅挖渠段采用整体性较好的矩形明渠结构;考虑永久边坡稳定,建议在深挖渠段(当地面高于渠顶 2.0 m)

[2] ANSYS, Inc. ANSYS Structural Analysis Guide. ANSYS 7.0 HTML Online Documentation, 2002.

[3] 张家发. 土坝饱和与非饱和稳定渗流场的有限元分析[J]. 长江科学院院报,1994,11(3):41-45.

[4] 毛超熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社, 2001.

[5] 廖明亮,刘仕勇. 西藏达嘎水电站河床覆盖层坝基的稳定性评价与计算[J]. 水电站设计,2000,16(4):88-93.

作者简介:

杨庚鑫(1986-),男,四川乐山人,国能大渡河流域水电开发有限公司,高级工程师,博士研究生,从事水电工程技术及管理
工作;

陆嘉斌(1977-),男,陕西汉中,人,国能大渡河流域水电开发有限公司,高级工程师,工学学士,从事水电工程技术及管理
工作;

张泽彬(1967-),男,四川仁寿人,国能大渡河流域水电开发有限公司,高级工程师,工学学士,从事水电工程技术及管理
工作;

陈家琦(1996-),男,甘肃陇南人,中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,高级工程师,硕士研究生,从事水电工程
设计工作;

马德萍(1986-),女,重庆璧山人,成都市市政工程设计研究院有限公司,高级工程师,硕士研究生,从事市政工程设计
工作。

(编辑:廖益斌)

采用城门洞型暗渠结构。

参考文献:

[1] 张浩,邹诗绮,潘正泉. 岷河供水一期工程明渠衬砌面板开裂成因研究[J]. 中国水运,2019,19(9):177-178.

[2] 曾广运,郑兰君,汪雪梅. 冬水田改造后土壤理化性状变化探讨[J]. 中国农业通报,1999,15(4):35-36.

[3] 刘云龙,黄 欢,蒋友琼. 岷河供水一期工程总干渠穿越成都粘土区明渠高边坡滑坡原因分析及处理[J]. 四川水利, 2019(3):14-17.

[4] 水利部四川水利水电勘测设计研究院. 岷河供水一期工程可行性研究报告[R]. 2012.

[5] 单智杰. 成都粘土段明渠设计变更报告[R]. 成都:四川省水利水电勘测设计研究院, 2018.

作者简介:

董 劲(1975-),男,四川汶川人,高级工程师,学士学位,主要从事水利工程规划、设计与管理工作;

苏 春(1978-),女,四川成都人,高级工程师,硕士学位,主要从事水利水电设计 & 管理工作;

窦 攀(1990-),男,甘肃镇原人,工程师,硕士学位,主要从事水利水电设计 & 管理工作。

(编辑:廖益斌)