

西霞院反调节水库土石坝膜防渗工艺

束一鸣¹ 张利新² 袁全义² 陈 奇¹ 李彦礼¹ 吴海民¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 小浪底工程建设管理局, 河南 郑州 450002)

摘要 黄河西霞院反调节水库土石坝采用土工膜前置防渗, 通过设置土工膜并根据接触作用的三维数值计算得出膜周边锚固部位的相对位移, 设计该部位膜吸收位移的铺设方式。在环境温度 t_i 为 2~33℃ 范围内每间隔 5℃ 设置 3 个焊接温度 t_w , 通过对应焊接试样的拉伸、剥离试验, 获得 $t_i \sim t_w$ 关系曲线, 以指导施工焊接。通过焊接试样附着水分、尘埃、纤维的焊接试验, 证明复杂环境下保持焊接部位清洁对保证焊接质量的重要性。通过锚固试件的渗透试验, 证明锚固工艺的可靠性。通过对复合土工膜复合工艺的改造, 满足坝轴线弯曲段复合膜的拼接、铺设平顺。经蓄水一年后现场检查, 膜拼接、锚固部位运行可靠。

关键词 土工膜; 三维数值计算; 焊接试验; 锚固渗透试验; 土石坝防渗; 西霞院反调节水库

中图分类号 :TV49 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)06-0070-04

Geomembrane seepage control techniques of Xixiyuan earth-rock dam//SHU Yi-ming¹, ZHANG Li-xin², YUAN Quan-yi², CHEN Qi¹, LI Yan-li¹, WU Hai-min¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Xiaolangdi Multipurpose Project Construction and Administration Bureau, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Prepositive geomembrane seepage control is used in the earth-rock dam of the Xixiyuan Counter Reservoir along the Yellow River. The relative displacement in the position of the anchor point was calculated from the geomembrane arrangement and a three-dimensional numerical calculation of contact interactions, and the geomembrane paving pattern in this position was designed. In an environmental temperature (t_i) range from 5 to 35℃, three weld temperatures (t_w) were achieved every other 5℃. The $t_i \sim t_w$ curve was obtained through the tensile test and peel test of the welding sample, which guides welding construction. Weld experiments with welding samples containing water, dust or fiber show the importance to welding quality of keeping the welded area clean. The reliability of anchoring technology was proven through the permeability experiment of the anchor sample. The splicing and laying of composite geomembrane in the curved interval along the dam axis can meet the requirements of the process modification of composite geomembrane. After one year's operation for water storage, site inspection shows that the weld seals and anchor locations are reliable.

Key words : geomembrane ; three-dimensional numerical calculation ; welding experiment ; anchoring permeability experiment ; seepage control of earth-rock dam ; Xixiyuan Counter Reservoir

土工膜是一种防渗性能良好、造价低廉、施工简便的大坝防渗柔性材料。据国际大坝委员会 2005 年不完全统计, 已建 250 座土工膜防渗大坝中土石坝有 174 座。1996 年阿尔巴尼亚建成高 91 m 的 Bovilla 土工膜上游面防渗堆石坝, 2005 年冰岛建成高 196 m 的 Karahnjukar 土工膜上游面防渗堆石坝。我国黄河小浪底水利枢纽配套工程——西霞院反调节水库位于河南省境内的黄河干流上, 坝址距小浪底水利枢纽 16 km, 是一座综合型的大型水利工程。西霞院反调节水库总库容 1.62 亿 m³, 电站坝段最大坝高 51.5 m, 土石坝为上游面复合土工膜防渗砂砾石坝, 布置于混凝土坝段的两侧, 坝顶宽

8.0 m, 坝顶高程 138.2 m, 最大坝高 20.2 m, 土石坝坝顶总长 2 609 m, 上游坝坡 1:2.75, 下游坝坡分别为 1:2.25 和 1:2.5。坝基防渗采用混凝土防渗墙。河床与左岸段土石坝防渗采用长丝 PE 复合土工膜, 规格为 400 g (质量不小于 400 g/m², 下同), 0.8 mm (膜厚) 400 g; 右岸段土石坝防渗采用短丝 PE 复合土工膜, 规格为 400 g 0.6 mm 400 g, 幅宽大于或等于 4.5 m。坝坡复合土工膜底部与上游坝坡脚处的混凝土防渗墙相接, 顶部与坝顶防浪墙相连, 复合土工膜在河中段与电站坝段的混凝土导墙连接, 在两岸与岸坡相连接, 形成了大坝完整的防渗体系。这是我国自 20 世纪 80 年代聚乙烯或聚氯乙烯土工膜用

作者简介: 束一鸣(1952—) 男, 江苏无锡人, 教授, 硕士, 从事水工结构与土工合成材料应用研究。E-mail : yimingshu2004@yahoo.com.cn

于大坝防渗以来第一次用于大江大河干流大型工程土石坝的防渗。

1 关键部位膜位移分析及其工程对策

1.1 分析方法

采用数值方法分析土工膜防渗结构的目的在于掌握土工膜在坝体运行位移过程中的安全性,所以分析必须具备两个条件:一是必须有土工膜单元存在,二是必须考虑土工膜与周围土体的相互作用。

分析计算采用基于三维显式的快速拉格朗日FLAC^{3D}数值分析软件,土工膜剖分为格栅(geogrid)单元,土工膜与砾卵石之间设置接触单元。坝体中土工膜采用弹性模型。

坝体砾卵石材料本构关系采用邓肯张弹性非线性模型,其切线模量表示为

$$E_t = \left[1 - \frac{R(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

$$\mu_t = \frac{G - F \lg \frac{\sigma_3}{P_a}}{(1 - A)^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]} \quad (3)$$

E_t, μ_t 表达式涉及的计算参数按试验及工程类比确定见表1。土工膜的计算参数为:弹性模量180 MPa,泊松比0.35,摩擦角20°,黏聚力0 kPa。

1.2 工程对策

由于土工膜为柔性材料,所以其运行安全性主要体现在周边锚固部位。锚固于混凝土结构上的土工膜应避免发生“夹具效应”^[1]。若采用传统折叠等方式形成“伸缩节”,在一定水头作用下,由于摩擦效应,折叠部分难以舒展,土工膜吸收位移的目的不能实现,折叠部分的强度与伸长率也将大大降低^[1-2]。经计算,蓄水后土石坝与混凝土导墙、防渗墙连接处的最大相对位移约为13 cm。连接部位与竖向位移见图1~3。



图1 土石坝与混凝土导墙连接部位



图2 土石坝与导墙连接部位三维单元剖分

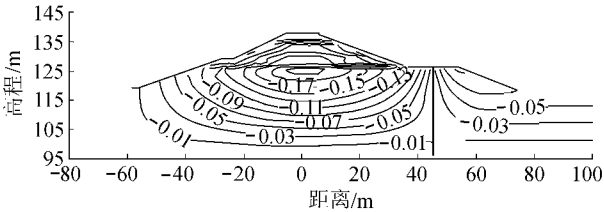


图3 土石坝最大剖面竖向位移(单位:m)

连接部位土工膜吸收位移的对策为:将锚固处的土工膜向垂直于膜铺设平面方向先伸展20 cm,然后再转90°铺设于坝面。蓄水运行发生位移后,土工膜将回到初始设计位置,即坝体位移后土工膜内不发生拉伸变形^[3]。

2 土工膜焊接工艺

2.1 不同气温下现场焊接温度选择

选择适合于0.8 mm以下厚度PE膜焊接的国产热楔型自动爬行焊接机,作为PE膜的焊接设备。

土工膜的熔融温度与土工膜材质有关。如LDPE的熔融温度为108~126℃,HDPE的熔融温度为126~136℃。土工膜现场焊接温度与焊接设备

表1 坝体材料计算参数

材 料	$\rho_d/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f	G	F	D	K_{ur}	E/MPa	μ
坝体砂砾卵石	2100	0	32	600	0.62	0.71	0.30	0.15	6.54	1000		
坝基砂砾石	2100	0	32	650	0.64	0.73	0.29	0.15	6.50	1100		
砂砾石与混凝土接触			22	3.5×10^4	1.00	0.90						
砂砾石与土工膜接触			20	2.0×10^4	1.00	0.80						
混凝土	2400										22000	0.167
基 岩	2100										800	0.270

有关,如热楔型焊机现场焊接温度为与膜直接接触的热楔的温度,热风型焊机为不与膜直接接触的吹风口的温度。即使热楔型焊机和热风型焊机这两种设备的现场焊接温度相同,作为受体的土工膜所接受的热量还是不同的。对于同一种焊接设备,土工膜的焊接质量与土工膜环境温度 t_i 密切相关,主要通过调节焊接温度 t_w 补偿环境温度 t_i 的影响。而对于同一种土工膜,不同的厚度其适宜焊接温度也有差异。土工膜现场施工有其适宜的环境温度条件,气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上是不宜进行土工膜铺设施工的。西霞院反调节水库防渗工程在基本适宜土工膜现场焊接的环境温度 $2\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,约每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设置一个环境温度的焊接温度试验点。根据以往经验,每个试验点采用 3 个不同的焊接温度,每个焊接温度取 6 个试样,通过拉伸、剥离试验,取其中最佳者作为该环境温度下适宜的焊接温度。土工膜厚度分别为 0.8 mm 、 0.6 mm ,在不同的环境温度下,焊接试样的 252 次拉伸试验结果见图 4。

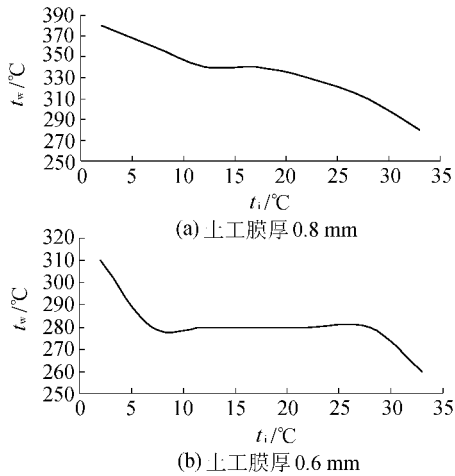


图 4 由拉伸强度确定的适宜焊接温度与环境温度关系曲线(膜厚)

2.2 特殊情况下现场土工膜焊接工艺

在正常情况下,当环境温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,PE 膜的焊接温度为 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$,焊接速度为 1.8 m/min ,焊缝质量检测充气压力达 0.4 MPa (0.4 MPa 已达到充气压力表的上限),持续时间 5 min 以上时,焊缝正常。在以下 3 种特殊情况下,焊接温度均比正常情况提高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

a. 土工膜被露水、细雨潮湿的情况。土工膜的焊接缝部位潮湿,类似清晨露水或雨后尚未干燥的情况,焊接参数与充气检测结果见表 2,焊接试样见图 5。潮湿不仅降低了焊接时土工膜表面的熔化温度,而且土工膜表面不平整与水膜层表面张力导致土工膜表面的潮湿程度不同,致使土工膜表面温度的降低极不均匀,导致土工膜部分熔化不足,部分熔化过量,焊接质量难以保证。

表 2 模拟清晨露水状态下的焊接试验

状 况	t_i / $^{\circ}\text{C}$	t_w / $^{\circ}\text{C}$	焊接速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	焊缝爆裂时的 充气检测压力/ MPa
正常状况	22	320	1.8	≥ 0.40
露水沾膜	22	330	1.8	0.14
尘埃落膜	22	330	1.8	0.24/0.40 (补焊后爆裂压力)
膜黏纤维	22	330	1.8	0.14



图 5 潮湿状态焊接检测试样

b. 土工膜被尘埃污染的情况。在土工膜焊接缝部位飘洒一些尘土,类似大风天气工地道路上由于工程车辆经过扬起的尘埃落到焊缝部位的情况。焊接参数与充气检测结果见表 2,焊接试样见图 6。在焊接过程中,尘埃不仅会降低焊接温度,更重要的是尘埃掺进熔化的土工膜焊缝中,使焊缝不再是纯 PE(聚乙烯)材料,降低了土工膜焊缝的抗拉强度与剥离强度。当尘埃在焊缝上连续分布时,相当于杂质已贯通焊缝,使其强度明显降低。

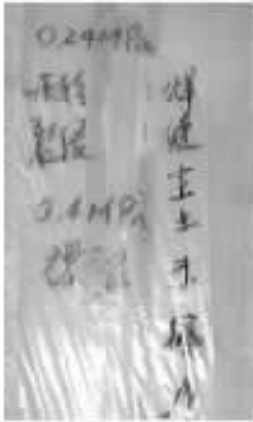


图 6 尘埃状态焊接检测试样

c. 织物纤维黏于焊缝的情况。由于织物与土工膜复合的生产工艺原因,有时在土工膜焊缝部位黏有 PET(涤纶)纤维,此时焊接参数与充气检测结果见表 2,焊接试样见图 7。由于 PET 的熔化温度明显高于 PE,所以当采用适宜土工膜焊接温度时,PET 纤维不会熔化,这些纤维和其他杂质一样影响焊接面的融合,导致充气压力不到 0.2 MPa 时即发生焊缝爆裂。

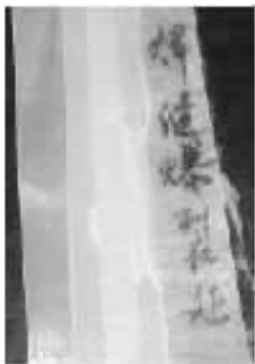


图7 黏有纤维状态焊接检测试样

鉴于以上试验与分析,当露水或降雨后明显不再降雨时,将潮湿的土工膜的表面干燥,至少用不同的干毛巾擦拭2遍以上,待土工膜表面在大气中充分干燥后,再按正常操作规程操作。大风天气适逢工程车辆频繁经过土工膜焊接现场时,应停止土工膜焊接施工。偶尔遇工程车辆经过,有少许尘埃降落时,需在焊接机前面清洁土工膜的表面,保证焊缝在清洁状态下融合。对于焊接缝上黏有织物纤维时,应人工去除。对于附着较牢的纤维,应采用细砂纸擦拭,只将纤维擦去即止,然后,将焊接表面擦拭干净,待擦拭面干燥后进行正常焊接。

3 土工膜锚固及其渗透试验

3.1 土工膜锚固工艺

铺设于坝面的土工膜除了上部埋置于坝顶防浪墙下游侧槽沟内以外,底部与两侧均锚固于混凝土结构上。由于土工膜底部锚固于混凝土防渗墙的长度超过2600m,所以锚固结构的防渗可靠性十分重要。现场该部位锚固结构工艺为:混凝土墙顶磨平后安装氯丁橡胶下垫带,其上安装土工膜,土工膜上安装氯丁橡胶上垫带,再安装槽钢,最后按设计要求拧紧螺栓。螺栓和螺母的收紧力是通过槽钢两个翼缘施加到橡胶垫带和土工膜上的,使混凝土面与橡胶垫带及土工膜之间的空隙压紧、密封,达到止水的目的。

3.2 锚固件渗透试验

在实验室用渗透试验模拟现场锚固工艺,将混凝土面以槽钢替代,其变形刚度可满足实际螺栓收紧力作用的要求。试件上的安装材料及安装工艺与现场相同,通过高压水泵、金属管路和压力水箱对土工膜与锚固面之间施加水压,量测渗透水量。试验时,每增加0.1MPa压力,一般稳定15min后再增加下一级水压,当水压力为0.2MPa时,稳定持续时间为15h,当水压力增加至0.5MPa时,稳定维持时间为5h。锚固渗透试验的试件一共3件,取各个试件试验值的算术平均值作为锚固渗透试验的结果,具体数值见表3。

表3 水压0.5MPa时土工膜与地基混凝土防渗墙锚固渗透试验参数

试件编号	持续时间/h	渗流总量/mL	单位渗流量/($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
试件1	5	107	0.0119
试件2	5	0	0
试件3	5	11	0.0012

从表3可见,在50m水头作用下,试件1和试件3的渗流量很小,试件2无渗流现象,3个试件的单位平均渗流量为 $0.0043 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。坝体长度约为2600m,理论上坝基锚固总渗流量约为 11.2 mL/s 。实际上现场大面积施工的工艺操作水平低于试件,但即使渗流量高出几个数量级,绝对值仍然很小。

4 特殊部位处理

土石坝靠近河床段的弯段使铺设土工膜呈扇面,而土工膜成品均为矩形,所以,该弯段土工膜铺设平顺的关键是土工膜拼接符合扇面形状及其尺寸。细化到每幅土工膜搭接边的首尾宽度差 Δ 为:

$$\Delta = \frac{a - b}{n} \quad (3)$$

式中: a 为弯段土工膜首部搭接宽度的总和; b 为弯段土工膜尾部搭接宽度的总和; n 为弯段拼接土工膜的幅数。

由于复合土工膜的正常生产工艺只能获得等宽度的焊接边,为了使铺设于弯段的每幅复合土工膜的搭接边首尾均相差 Δ ,由工程技术人员与生产商共同完成了对土工膜复合工艺的改造。

5 结 语

黄河西霞院复合土工膜防渗土石坝于2007年5月竣工,经过1年的蓄水运行后降低水位,将当时施工记录中土工膜焊接缺陷修补最多的焊缝处从上到下全部掀开护坡检查,土工膜及其接缝完好,未发现任何渗漏点,表明复合土工膜防渗结构的工艺合理,焊接接缝与周边锚固运行可靠。

参考文献:

- [1] 束一鸣,李永红.较高土石坝膜防渗结构设计方法探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):60-64.
- [2] WESSELOO J, VISSER A T, RUST E. A mathematical model for the strain-rate dependent stress-strain response of HDPE geomembranes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22: 273-295.
- [3] 束一鸣.土工膜施工工艺及其经验教训[J].水利水电技术, 2002, 33(4):19-21.
- [4] 束一鸣,杨威,魏蓬,等.基于三维拉格朗日法的大堤应力及裂缝分析[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):175-179.
- [5] 花加凤,束一鸣,张贵科,等.土石坝坝面防渗膜中的夹具效应[J].水利水电科技进展,2007,27(2):66-68.

(收稿日期:2009-08-22 编辑:胡新宇)