

DOI: 10.11779/CJGE2016S1003

土工膜在溧阳抽水蓄能工程中的应用

石含鑫, 胡育林, 常姗姗

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 溧阳抽水蓄能电站上水库地质条件复杂, 库盆防渗体系由于库底填渣厚度变化大, 不均匀沉降较大, 设计选定防渗材料适应不均匀变形能力强的 HDPE 土工膜作为上水库库底防渗体系; 在减少渗漏损失的同时, 可以降低工程施工难度。主要介绍了土工膜防渗方案的设计及应用, 包括防渗层材料的选择及设计、土工膜周边连接设计、土工膜施工工艺等。

关键词: 土工膜; 库底防渗; 溧阳抽水蓄能电站

中图分类号: TV543 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0015-06

作者简介: 石含鑫(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事水电水利工程设计与研究工作。E-mail: 80993736@qq.com。

Application of geomembrane in Liyang Pumped Storage Power Plant

SHI Han-xin, HU Yu-lin, CHANG Shan-shan

(Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: The geological condition of the upper reservoir for Liyang Pumped Storage Power Station is complex. Because the thickness of filled landfill at the bottom of the reservoir varies rapidly and the differential settlement is large, the HDPE geomembrane is adopted as the material of reservoir bottom seepage prevention system owing to its flexibility to unequal transformation, which reduces the seepage loss and make the construction be easier. The design and application of geomembrane seepage prevention system are introduced, including selection and design of materials for seepage prevention layer, surrounding connection design of geomembrane, construction method of geomembrane etc.

Key words: geomembrane; seepage prevention of reservoir bottom; Liyang Pumped Storage Power Plant

0 前 言

溧阳抽水蓄能电站位于江苏省溧阳市境内, 为一等大(1)型工程, 电站装机容量 1500 MW(6 台×250 MW), 电站发电最大水头 290 m, 最小水头 227.7 m, 额定水头 259.0 m。枢纽建筑物主要由上水库、输水系统、发电厂房及下水库等部分组成。

上水库库岸由北、西、南三面山脊组成, 并利用伍员山工区龙潭林场 2 条较平缓的冲沟(芝麻沟和青山沟)在东侧筑坝, 库盆按挖填平衡考虑修挖后形成上水库。上水库正常蓄水位 291.00 m, 死水位 254.00 m, 调节库容 1195 万 m³。

从整体上看, 库周分水岭整体上较单薄(尤其是南岸和北岸), 岩体内断层及节理裂隙密集发育, 形成了较好的透水网络, 库周地下水位及相对不透水层顶板埋藏深, 均低于水库正常蓄水位, 水库蓄水后, 库水将通过分水岭向库外渗漏。同时, 由于小断层发育, 也易形成库水外渗的集中通道, 并有沿其发生渗透变形的可能。此外, 水库的集雨面积小, 天然来水量少, 故该蓄能电站对上水库的库盆防渗要求较高。因此,

上水库需做全库盆防渗处理, 拟采用“库周混凝土面板防渗, 库底挖填处理平整后表面柔性材料防渗”的防渗方案。

库底防渗体系由于低洼区填渣体的厚度变化较大(厚度 1.5~75 m), 因而引起的不均匀沉降变形较大, 防渗材料应具备适应较强的不均匀变形能力, 故宜采用柔性材料防渗; 因此, 库底防渗设计与施工质量成为影响本工程安全运行的关键因素之一。

在收集国内外相关的工程资料及借鉴相关经验的基础上, 根据本工程上水库地形及工程地质条件, 从减少上水库死库容及大量的弃渣堆存, 缩短水库的初期蓄水时间, 降低施工难度及运行检修难度, 减少运行维护费和节约工程投资等多方面考虑, 前期阶段设计对库岸及库底防渗做了多方案研究比较、理论分析与科学实验, 经技术经济比较, 最终推荐“库岸及坝体采用混凝土面板防渗, 库底采取石渣回填后表面土工膜防渗”方案。

土工膜是一种柔性防水材料,具有良好的防渗性、耐热性、耐寒性和化学稳定性,有较大的抗拉强度与断裂伸长率,适应不均匀沉降的能力强,且造价低,现已大量应用于水库防渗工程,如石砭峪水库防渗加固坝高、泰安抽水蓄能电站库底防渗等。本工程库底采用土工膜防渗符合工程的实际情况。

土工膜作为库底的防渗体,通过廊道、连接板与库岸、大坝的混凝土面板结合形成完整的全库盆防渗体系。溧阳抽水蓄能电站上水库主坝坝址地形不规则,基岩地质构造复杂,采用的筑坝材料岩性多(部分利用上水库强风化料);库底采用回填石渣,堆渣高度超过70 m,其不均匀变形较突出。为此,在招标设计阶段,委托河海大学水电学院承担了上水库大坝(包括库底回填区)的结构安全分析,包括坝坡稳定计算、坝体断面优化分析、三维有限元计算分析、土工膜变形特性分析等研究内容,为大坝结构优化及土工膜选材提供依据,在技施阶段,在坝体填筑料开展相关室内试验基础上,补充进行大坝三维有限元计算分析,对坝体及库底改进后的优化方案进行三维有限元静动力计算复核分析,证明本工程设计的防渗体系是安全的。现行规程规范对土工膜防渗层结构及水力计算和稳定性等均进行了详细规定,本工程主要根据自身特点,按规范要求,提出了适应深厚回填石渣体变形要求的防渗土工膜性能指标、变形控制措施和细部连接结构设计等,以供工程采用。

1 库底防渗体系设计

本工程库底防渗面积约25万m²,开挖区及回填区各占1/3和2/3。由于库底回填体厚薄不一,根据三维静动力有限元计算与分析成果,回填库区竣工期最大沉降量为125 cm,满蓄期最大沉降量为170.4 cm,库底的不均匀沉降较大。因此,库底防渗体需满足适应基础不均匀变形大、与面板堆石坝连接板变形相协调、防渗性能高等要求。

全库底采用土工膜作为单一防渗层,防渗体顶部高程239.80~247.80 m,承受最大/最小的工作水头为51.84 m/6.2 m,日最大工作水头变幅为37 m。库底采用“高削低填”方式,在地势高于高程245.80 m部位开挖成一高程为245.80 m的平台,地形低于此高程部位利用石渣回填至高程245.80 m,在回填区内距库底开挖平台外边线水平距离10 m处按1:5坡比开挖成一斜坡过渡。

上水库库底平台开挖区和回填石渣区表面防渗体系结构层由上至下依次为0.1 m厚混凝土预制块护面、无纺长丝土工布(500 g/m²)、1.50 mm厚HDPE

土工膜、三维复合排水网(1300 g/m²)、5 cm砂垫层、0.4 m厚碎石下垫层、1.5 m厚过渡层,其下为开挖基岩面或回填石渣顶面。

1.1 库底防渗材料的选择及型式

本工程库底防渗面积大、土工膜承受水头高。参考国内外渠道防渗、海岸防护、土石坝等工程应用土工合成材料的经验,应尽量减少接缝,经向厂家了解,聚乙烯(PE)土工膜生产幅宽可达8.0 m,是20世纪80年代兴起的一种新型合成土工防水材料,具有优异的性能指标,其可焊性、抗老化能力、耐化学腐蚀能力、耐环境应力开裂能力及抗戳穿能力强,铺设施工简单。通过调研分析国内外部分厂家提供的产品技术性能,并经试验论证,高密度聚乙烯(HDPE)土工膜各项技术指标均好于普通PE膜及PVC膜,故选用HDPE土工膜。

复合土工膜作为库盆的防渗体,设置在库底,使库盆回填区结构发生变化;原来相对紧密结合在一起的土石料,由一道柔软、平整的复合土工膜所隔开,土石料之间只能通过复合土工膜间接地连接在一起。只有当复合土工膜随库底回填料作拉伸变形时,才能对土石料的变形起一定的约束作用,且其抗拉劲度越大,对土石料变形的约束作用就越大。

在有限元计算中,对于埋设在库盆的复合土工膜成为沿库盆底部平面的一组既不能承受弯矩,也不能承受压力的柔性平面单元。根据复合土工膜的拉伸试验曲线,经向拉伸应变介于0~50%之间,拉力与应变接近线弹性关系;纬向拉伸应变介于0~80%之间,拉力与应变接近线弹性关系。库盆内复合土工膜的实际工作状态一般应变不超过20%,计算时取其应力应变关系为线弹性模式,考虑复合土工膜经向与纬向的性质不同而取不同的弹性常数。

由三维有限元静动力有限元计算与分析成果得知,本工程土工膜承受的拉力竣工期经向/纬向分别为1.23 (kN/m)/1.23 (kN/m),满蓄期经向/纬向分别为6.18 (kN/m)/9.28 (kN/m),故选用高密度聚乙烯(HDPE)土工膜。经调研国内多家规模较大的生产厂家提供的土工膜材料性能指标,结合规范要求,提出了本工程所用土工膜的物理力学性能指标应不低于表1的要求。

1.2 土工膜厚度确定

土工膜厚度直接影响工程质量,从考虑减少渗漏、避免施工破损、水压击穿、地基变形、土工膜撕裂等方面的要求,土工膜必须有一定厚度。

土工膜厚度与膜下垫层的粒径和承受的水头有关。有关试验成果表明:垫层的粒径小,级配好,土

表 1 HDPE 土工膜物理力学指标^[2]

Table 1 Physical and mechanical indexes of HDPE geotechnical membrane

项 目		单 位	数 值
密 度		g/cm ³	0.9525
吸水率		%	0.02
炭黑含量		%	2.4
熔体流动速率	横向	g/10min	0.13
	纵向	MPa	19.1
拉伸屈服强度	横向	MPa	19.2
	纵向	%	16
拉伸屈服伸长率	横向	MPa	31.5
	纵向	MPa	32.1
拉伸断裂强度	横向	%	772
	纵向	%	764
拉伸断裂伸长率	横向	N/mm	146
	纵向	N/mm	145
尺寸稳定性(100 °C, 15 min)	横向	%	-0.45
	纵向	%	-0.33
抗戳穿力		N	648
200°C时氧化诱导时间		min	>135
-70°C低温脆化冲击性能		—	通过
水蒸气渗透系数		g/m·s·Pa	4.86×10 ⁻¹³
耐环境应力开裂		—	2000h 无破损

工膜承受水压力的能力就高。土工膜厚度计算采用《土工合成材料工程应用手册》^[3]中, 即 1987 年原苏联出版的《土坝设计》中的计算公式:

$$t = 0.135E^{1/2} \frac{Pd}{[\sigma]^{3/2}} \quad (1)$$

式中 E 为在设计温度下薄膜的弹性模量, 120 MPa; P 为薄膜承受的水压力, 0.518 MPa; $[\sigma]$ 为薄膜的容许拉应力, 3 MPa; d 为与膜接触的土、砂卵石的最大粒径, 4 mm; t 为薄膜厚度, 单位为 mm (若 $t < \frac{1}{3}d$,

则采用 $\frac{1}{3}d$)。

本工程上水库库底承受的最大工作水头为 51.84 m, 计算得土工膜的厚度为 0.665 mm, 小于 $\frac{1}{3}d = 1.333$

mm。根据 SL/T231—98《聚乙烯(PE)土工膜防渗工程技术规范》^[4]要求, PE 土工膜厚度设计可按理论公式计算, 或用试验法确定厚度, 此外尚应考虑暴露、埋压、气候、使用寿命等应用条件。而土工膜在使用中下垫层总是存在尖角, 且根据各项试验成果表明, 膜厚则老化得慢, 所以膜厚的确定还应考虑这些因素, 选用时需留有较大的安全系数。

根据计算膜厚 1.33 mm, 借鉴国内外类似工程的经验, 综合考虑最终选择厚度为 1.5 mm 的 HDPE 膜。

1.3 土工膜防渗层结构设计

土工膜防渗结构由下部支持层、土工膜防渗层、

上部保护层组成。

(1) 下部支持层

土工膜防渗体下部支持层应满足以下功能: ①具有一定的承载能力, 以满足施工期及运行期传递荷载的要求; ②有合适的粒径、形状和级配, 限制其最大粒径, 避免在高水头作用下土工膜被顶破; ③保证土工膜下的排水通畅; ④库底碾压石渣和土工膜之间的填筑料粒径应逐渐过渡, 满足层间反滤关系, 以保证渗透稳定。

根据 SL/T231—98《聚乙烯(PE)土工膜防渗工程技术规范》^[4]要求, 土工膜应铺设在密实的基础上, 层面应平整。与膜接触的表面宜为碾压密实的细土料层、细砂层或混凝土层, 层面应平整。

根据以上因素, 土工膜下部支持层自上而下依次为: 1300 g/m² 三维复合排水网、5 cm 厚砂垫层、40 cm 级配碎石垫层、150 cm 厚过渡层。

(2) 土工膜防渗层

本工程防渗要求较高, 采用的土工膜厚度较大, 若选用复合土工膜, 在膜布热复合后, 两侧未复合预留连接部位会有严重的折皱现象, 从而影响土工膜的接缝焊接质量; 另一方面复合土工膜中膜本身的质量也不如光膜, 表面缺陷也多于光膜。因此, 土工膜防渗层选用厚度 1.5 mm 的光面 HDPE 膜。土工膜宽度的选择应使膜在施工时接缝最少, 尽可能选用较大的幅宽, 根据调研厂家生产能力, 土工膜宽度采用 8 m。

(3) 上部保护层

为使土工膜表面避免紫外线照射、高低温破坏、生物破坏和机械损伤等, 土工膜上部应设置保护层, 保护层为 500 g/m² 土工布, 再用预制块进行压覆。

(4) 土工膜防渗层渗漏量计算^[3]

土工膜防渗层的渗漏量由两部分组成: 由于土工膜本身渗透产生的渗漏量和施工中产生的土工膜缺陷引起的渗漏量。

根据工程类比法确定土工膜渗透系数 k 为 10⁻¹² cm/s, 应用达西定律计算各运行工况土工膜本身产生的渗水量, 计算公式为

$$Q = kA \frac{H}{L} \quad (2)$$

式中 k 为土工膜的渗透系数; A 为渗流过水断面面积; J 为渗流坡降; H 为渗流水头; L 为沿 H 的流程。

假设土工膜 4000 m² 有一缺陷, 按等效直径 3 mm 考虑, 根据孔口出流计算施工中产生的土工膜缺陷引起的渗漏量, 其计算公式:

$$Q = \mu An(2 \times 9.81H)^{0.5} \quad (3)$$

式中 μ 为流量系数; A 为单个缺陷面积; n 为缺陷的个数; H 为渗流水头。计算成果见表 2。

从表2中的计算成果可见,库底土工膜本身渗漏量约为 $70.08\text{ m}^3/\text{d}$,土工膜缺陷渗漏量为 $742.12\text{ m}^3/\text{d}$ 。土工膜总渗漏量为 $812.2\text{ m}^3/\text{d}$,约占总库容的万分之0.58,渗漏量较小,满足工程要求。

表2 土工膜防渗层的渗漏量

Table 2 Seepage quantity of impervious layer of geotechnical membrane

计算工况	渗流水头 H/m	土工膜本身产生的渗漏量 $Q_1/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	施工缺陷引起的渗漏量 $Q_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	总渗漏量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
正常蓄水位	291.00	69.22	737.53	806.75
设计洪水位	291.44	69.81	740.69	810.50
校核洪水位	291.64	70.08	742.12	812.20

1.4 土工膜防渗结构接头设计^[5]

(1) 接缝及松弛量

土工膜的接缝设计应使接缝数量最少,且平行于拉应力大的方向;接缝设在平面处,避开弯角。HDPE膜接缝采用焊接工艺连接,焊接搭接宽度约12cm。焊接接缝抗拉强度应不低于母材强度,在订货时要对厂家提出留边和长度要求,以利焊接。

为协调土工膜防渗体与其下底部堆渣、面板和岸坡等连接部位的变形,平面上应留有一定松弛度,且在转折处预留褶皱裕度。土工膜按松弛铺设,释放应力,避免因长期应力或反复应力作用下,使聚合物产生蠕动或疲劳而失去强度,因而变薄或破裂。

(2) 土工膜与面板连接板和库底观测廊道连接设

计

土工膜与面板连接板、库底观测廊道采用锚固连接,见图1所示;将1.5mm厚土工膜伸入锚固槽内与螺栓机械连接,土工膜与锚固槽接触部位涂刷SR底胶及SR找平层,固定后槽内回填M7.5砂浆,锚固槽上方加设一层宽600mm、厚1.5mm的土工膜,两边各伸入100mm与下方的土工膜焊接,最后覆盖土工布(500g/m²)保护,最终形成一完整的封闭系统。

(3) 土工膜与上水库进(出)水口连接设计

土工膜与上水库进(出)水口采用螺栓机械连接,施工顺序从上至下依次为:宽200mmSR底胶两道、宽200mm厚5mmSR找平层、200mmSR底胶两道、1.5mm厚光面HPDE土工膜、200mmSR底胶两道。螺栓固定好后表面用C25二期混凝土压实,三维复合排水网(1300g/m²)及土工布(500g/m²)均伸入二期混凝土内且不小于200mm,使其形成一完整的封闭系统;见图2所示。

1.5 土工膜变形控制设计

本工程防渗HDPE土工膜主要水平向大面积铺设于上水库库底面,其变形控制因数主要起源于其上作用水头大小、其下回填石渣区变形情况及土工膜自身适应变形能力等方面。从其上作用水头来看,最大工作水头在51m左右,因为电站运行的需要,不可能通过减小水头来满足土工膜变形控制,只能通过提高土工膜自身材料性能指标以适应变形的能力,以及减少下部回填石渣体后期沉降变形量等方面进行控制。前者可通过生产厂家改进原材料配比、引进先进生产设备、加强生产过程控制实现。对于后者,控制措施详述如下。

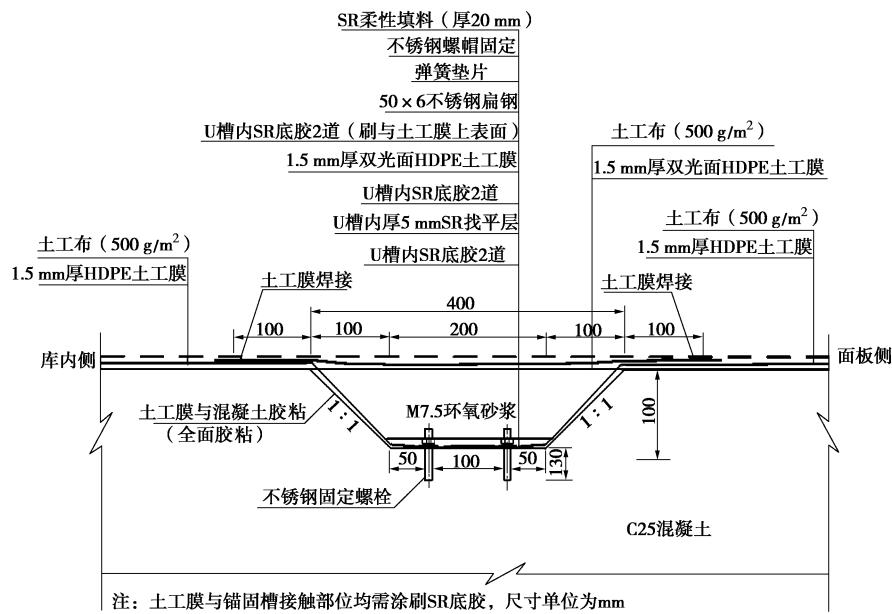


图1 土工膜与连接板、排水廊道连接示意图

Fig. 1 Sketch map of connection between soil membrane and connecting plate and drainage corridor

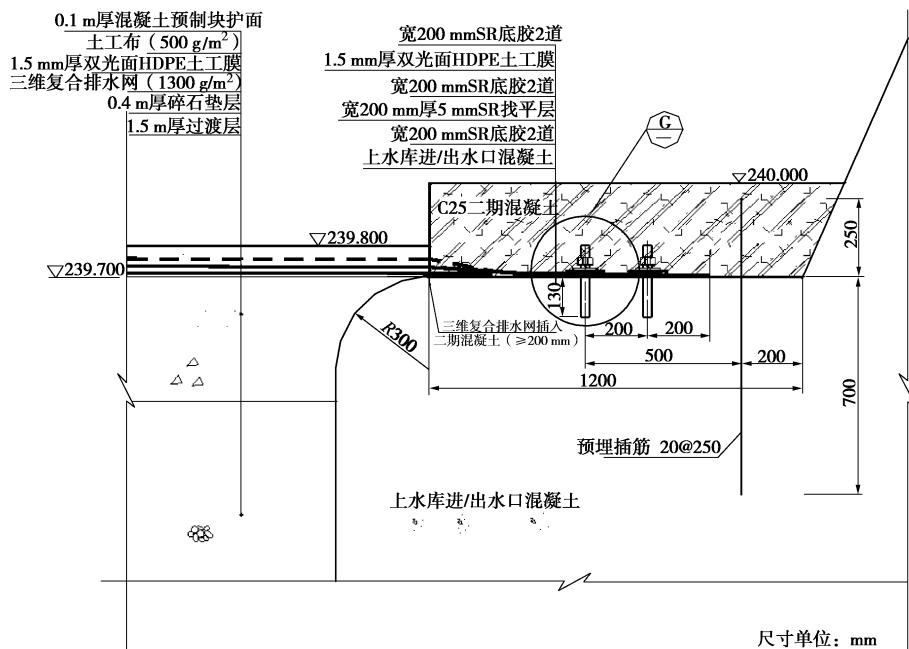


图 2 土工膜与上水库进(出)水口连接示意图

Fig. 2 Sketch map of connection of geotechnical membrane and inlets and outlets of upper reservoir

对库底回填区石渣体,因采用的回填料质量较差,实际施工时采用 25 t 自行式振动碾分层碾压施工(压实层厚按 80 cm 控制、碾压 8 遍、洒水量 8%),以确保碾压后的干密度和孔隙率满足设计要求,保障后期沉降变形量尽可能少且均匀。同时,回填石渣碾压施工完成后再预留 3 个月以上沉降期,才施工表面土工膜。此外,在上水库进出水口塔体基座周边部分,表层以下深 5 m、宽 10 m 范围内的垫层料及过渡料采用掺水泥和铺设加筋土格栅方式回填碾压密实,以确保井周部分的回填体沉降变形尽可能小,以满足土工膜变形控制要求,防止土工膜在与井周连接部位因底部变形过大而破坏。

此外,为减少上水库库底回填区不均匀沉降对土工膜防渗系统的不利影响,根据有限元计算成果中蓄水期库底沉降等值线分布图,本工程在库底石渣回填区采取预留沉降超高措施:以挖填分界线为起始点,将水库西侧库底廊道侧区域回填按1%预填缓坡过渡,将东侧主坝连接板侧区域回填按5%预填缓坡过渡,最大超填厚度为70cm。这样既适当增加了土工膜的铺设长度,避免土工膜在蓄水期因沉降产生过大的拉伸变形,又改善库底沉降变形和应力条件,避免库底防渗体因不均匀沉降产生破坏,达到了预期效果。

2 土工膜施工技术要求

(1) 土工膜铺设前, 对采购并运抵工地的土工膜应根据设计规定的指标要求进行抽样检查, 经检验质量不合格或不符合设计要求的同批次土工膜, 不得使

用。运至施工现场的土工膜应在当日用完。

(2)上水库土工膜铺设及焊接应在现场环境温度5℃以上、风力3级以下并无雨、无雪的气象条件下进行，施工环境最高气温以不对施工人员的身体造成伤害为限制温度（建议为35℃左右）。场区排水顺畅，施工现场环境应能保证土工膜表面的清洁干燥并采取相应的防风、防尘措施，以防土工膜被阵风掀起或沙尘污染。若现场风力偶尔大于3级时，应采取挡风措施防止焊接温度波动，并加强对土工膜的防护和压覆。

(3) 所有 T 型接头, 十字型接头部位均要求打圆形补丁膜片加强处理, 土工膜与连接板、廊道、交通桥、进水口周边及所有锚固连接处的施工均须通过生产性试验确定相关施工参数后方可正式施工。

(4) 本工程土工膜铺设范围约 25 万 m^2 , 面积大, 焊缝数量众多, 设计要求在强力拉伸作用下, 土工膜母材断裂, 而土工膜的接缝不破坏、也不可剥离。

(5)已完成铺设的土工膜需要及时铺设土工布保护并采用混凝土预制块压重,以防止太阳紫外线照射损伤及阵风吹翻损伤土工膜。

3 结论

(1) 抽水蓄能电站对上水库防渗要求高,本工程因地质条件差、无天然径流,水库采用全库盆表面防渗处理,其中库底采用土工膜全面铺盖防渗。根据计算分析库底不均匀沉降变形较大,土工膜作为柔性防渗材料能适应此情况。但土工膜用于水头较高,深厚层回填库底的防渗,其防渗效果有待工程蓄水运行后

进一步检验。

(2) 土工膜防渗的难点主要是控制变形量和土工膜接头的施工, 按照施工工艺要求采取合理的措施, 确保其施工质量, 是土工膜满足防渗要求、水库安全运行的关键所在。

(3) 通过合理设计、精心施工, 加上生产厂家工艺的不断改进与提高, 以及更多工程成功运行的实际检验, 土工膜在水电水利工程中将有着更为广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SL/T 225—98 水利水电工程土工合成材料应用技术规范 [S]. (SL/T 225 — 98 Standard for applications of geosynthetics in hydraulic and hydro-power[S]. (in Chinese))
- [2] 顾淦臣. 土工膜和复合土工膜的品种和特性. 水利规划与设计, 2000(3): 47 - 53. (GU Gan-chen. Variety and characteristics of geotechnical membrane and composite geotechnical membrane. Water Resources Planning and Design, 2000(3): 47 - 53. (in Chinese))
- [3] 土工合成材料工程应用手册编委员会. 土工合成材料工程应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Editorial Committee. Handbook for applications of geosynthetics in geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese))
- [4] SL/T 231—98 聚乙烯 (PE) 土工膜防渗工程技术规范 [S]. (SL/T 231—98 Standard for antiseepage engineering lined with polyethylene (PE) geomembrane[S]. (in Chinese))
- [5] NB/T35027—2014 水电工程土工膜防渗技术规范 [S]. (NB/T35027—2014 Technical code for geomembrane-based anti-seepage of hydropower projects[S]. (in Chinese))

(本文责编 明经平)