

DOI: 10.11779/CJGE2016S1007

# 复合土工膜应用于堆渣坝防渗设计

梁伦法, 李华艳, 石含鑫, 周英, 窦灿

(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:** 某水电工程堆渣坝坝体填筑料主要为建筑物开挖的砂岩风化料, 坝体采用复合土工膜斜墙防渗, 坝基设防渗帷幕。复合土工膜周边分别嵌入坝踵钢筋混凝土连接板、坝顶防浪墙、溢洪道左导墙内, 与防渗帷幕形成封闭的防渗体系。工程建成后从蓄水运行情况看, 坝体渗漏量略偏大, 土工膜防渗效果有保障。

**关键词:** 堆渣坝; 复合土工膜; 斜墙; 防渗

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0037-05

作者简介: 梁伦法(1964-), 男, 教授级高工, 主要从事水工建筑物设计工作。E-mail: lianglunfa@163.com。

## Application of composite geomembrane in seepage control of slag dam

LIANG Lun-fa, LI Hua-yan, SHI Han-xin, ZHOU Ying, DOU Can  
(Zhongnan Engineering Corporation Limited of Power China, Changsha 410014, China)

**Abstract:** The filling materials of the slag dam in hydropower project mainly consist of weathered sandstone from previous excavation of the buildings. The dam with an inclined wall adopts the composite geomembrane to control seepage, while the dam foundation uses curtain. The composite geomembranes are respectively inserted into the connecting plate, wave wall and left guide walls of spillway around it, forming up a close seepage control system. Judging from the operation of the water storage after completion of the project, the seepage quantity of the dam is only slightly larger, and the sound seepage control status is ensured.

**Key words:** slag dam; composite geomembrane; inclined wall; seepage control

## 1 工程概况

某水电站位于柬埔寨德格河中游, 坝址以上流域集雨面积 104.6 km<sup>2</sup>, 坝址多年平均流量 4.11 m<sup>3</sup>/s, 多年平均径流量 1.296 亿 m<sup>3</sup>, 正常蓄水位 331.50 m, 总库容 4626 万 m<sup>3</sup>, 具年调节性能, 电站总装机容量 18 MW。电站枢纽工程由土工膜斜墙堆渣坝、右岸坝肩浆砌块石重力坝、右岸开敞式溢洪道以及右岸输水系统、发电厂房和左岸生态流量输水建筑物等组成。大坝坝顶总长度 604.68 m, 其中土工膜斜墙堆渣坝坝顶长 504.68 m。

工程为III等中型工程, 区域构造活动处于相对微弱的稳定期, 工程区地震基本烈度小于 6 度, 大坝按 3 级建筑物设计。

流域多年平均降水量约 2600 mm, 多年平均气温 27.7℃, 极端最高气温 40.5℃, 极端最低气温 13.3℃, 多年平均相对湿度 78%, 最大风速为 20 m/s。

坝址河谷呈 U 型, 坝址区多基岩出露, 两岸广泛分布残坡积细砂土、粉砂土及粉土。基岩地层多为侏罗系中统白垩系下统黄褐色厚层至巨厚层状长石石英砂岩、石英砂岩及灰绿色粉砂质泥岩与泥质粉砂岩,

呈互层状产出, 完整性好。

坝区发育一宽缓向斜, 岩层倾向上游偏河床, 倾角 8° ~ 15°。河床有顺河向 F<sub>3</sub> 断层, 断层带宽度 3~5 m。两岸地下水位较平缓, 水力坡降为 6%~13%, 岩体弱透水—中等透水。

### 1.1 防渗方案选择

坝址区地层存在软弱夹层, 不适合建重力坝, 只适宜建土石坝, 而工程地处原始次生林, 森林密布, 需充分利用建筑物开挖料, 尽可能减少对周围植被的破坏。附近没有防渗土料, 不适合建土质防渗材料的土石坝。

进坝道路长 29 km, 雨季通行能力差。混凝土面板堆石坝所需水泥、钢筋等外来材料量较大, 从而进坝道路运输压力大; 建筑物开挖料利用率低, 弃料多, 料场开采量大, 对植被破坏相对较大。且混凝土面板堆石坝方案大坝静态投资比土工膜斜墙堆渣坝方案多 820.27 万元, 综合技术经济比较, 推荐大坝采用复合土工膜防渗。

## 1.2 坝体结构及防渗系统

大坝坝顶高程 335.50 m, 坝顶宽 6 m, 混凝土连接板最低建基面高程 287.70 m, 最大坝高 47.80 m。大坝上游坝坡坡比为 1:2.5, 在高程 305.00, 320.00 m 处各设 1 级马道, 马道宽分别为 2, 4 m; 下游坝底高程 292 m, 下游坝坡在高程 315.00 m 处设 1 级马道, 马道宽 6 m, 马道以上坡比为 1:2, 马道以下坡比为 1:2.5。大坝采用 PE 复合土工膜(两布一膜)斜墙防渗。

坝体填筑料主要为大坝、溢洪道开挖风化砂岩混合料, 上游坝坡在满足自身稳定前提下, 设计较缓的上游坝坡坡比使复合土工膜在坡面上处于自稳、松弛状态。

复合土工膜规格为 500 g/m<sup>2</sup>/HDPE 1 mm/500 g/m<sup>2</sup>, 其表面为水平宽 950 mm 的碎石、中粗砂保护层和联锁预制块护坡, 其下为水平宽 650 mm 中粗砂、碎石垫层, 再后为水平宽 2 m 过渡区, 过渡区后为大坝填筑区。填筑区又分为坝轴线上游的 1 区和坝轴线下游的 2 区, 河床部位坝底部 294 m 以下设排水堆石料, 下游坝坡采用块石护坡。大坝典型剖面见图 1。各区材料填筑标准见表 1。

表 1 坝体各区填筑标准特征表

Fig. 1 Standard characteristic of filling in each area of dam

部位	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最大粒径/mm	孔隙率/%	压实厚度/cm
保护层	1.80	40	20	
垫层	2.15	40	17	40
过渡料	2.15	300	20	40
石渣料	2.10	600	20	60
石渣料	2.05	600	20	60
排水堆石料	2.15	300	22	60

为尽可能减少复合土工膜在运行期的变形受力,

将上游中部坝坡面设计成微拱形。

大坝坝基两岸挖除表层腐植土。河床基岩裸露, 建基面以弱风化砂岩为主, 中部有泥岩出露。河床断层进行刻槽、反滤处理。

复合土工膜采用焊接连接, 底部与混凝土连接板、顶部与防浪墙、右岸与溢洪道左导墙均采用嵌入式连接。

除左岸高程 324 m 以上连接板坐落在强风化中下部砂岩上, 其余连接板均坐落在弱风化砂岩上。

大坝采用复合土工膜斜墙防渗, 基础设单排水泥灌浆防渗帷幕, 河床部位设双排防渗帷幕, 帷幕防渗标准 5Lu, 伸入相对不透水层以下 5 m。

## 2 复合土工膜设计

### 2.1 大坝三维有限元分析

大坝采用三维快速拉格朗日法进行三维有限元计算, 计算工况为施工期、竣工期、正常运行期、设计洪水期、校核洪水期工况, 共分 12 级加载。

坝体材料及覆盖层本构关系采用 Duncan-Chang E-B 模型, 基岩体采用弹性模型, 各种堆石料的邓肯 E-B 模型计算参数根据工程类比及经验值确定, 如表 2 所示。

复合土工膜受力主要靠土工布承担, 计算时需考虑复合土工膜变形对坝体变形的约束作用, 计算时只考虑复合土工膜受拉, 不考虑受压, 在受压时, 去除膜的作用, 简化为一条柔索, 按柔索单元考虑。整个结构共剖分实体单元 3770 个, 结点总数 4360。

本工程复合土工膜的应变分析时只考虑蓄水后水压力荷载, 未计算砂石料在自重作用下的蠕变。

将坝坡面复合土工膜分为两个区: I 区为第一级马道 320.0 m 高程以上坝坡, II 区为 320.0 m 高程以下坝坡。

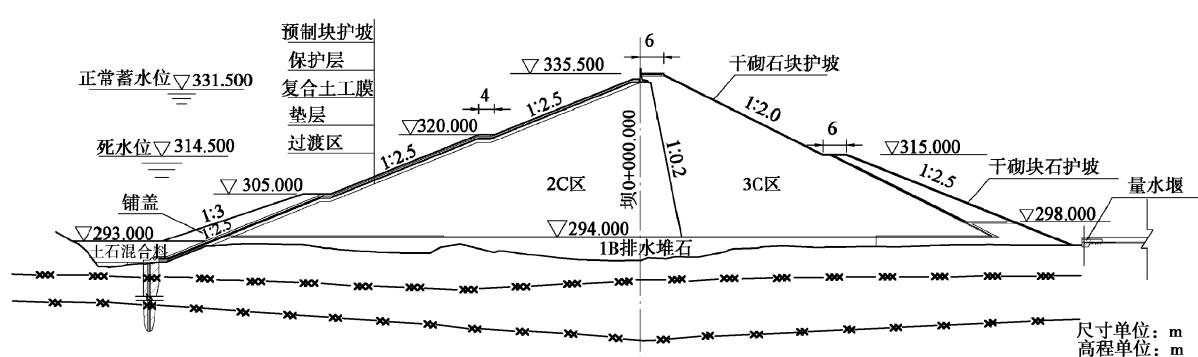


图 1 大坝典型剖面图

Fig. 1 Typical profile of the dam

表 2 E-B 模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of E-B model

材料名称	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$\varphi$ (°)	c /kPa	$\Delta\varphi$ (°)	$R_f$	K	n	$K_b$	m	$K_{ur}$	$n_{ur}$
1A 保护层	18	42.0	0	6.0	0.75	720	0.38	360	0.36	1440	0.22
2A 垫层	21.0	31.0	8	1.0	0.70	700	0.45	350	0.40	1400	0.40
1C 过渡区	21.5	35.0	6	1.0	0.72	680	0.42	340	0.38	1350	0.40
2C 填筑区	19.5	31.0	6	0.0	0.70	650	0.35	330	0.40	1300	0.40
3C 填筑区	19.0	28.0	8	1.0	0.72	600	0.32	300	0.40	1200	0.40
1B 排水堆石区	21.5	40.0	0	7.0	0.78	750	0.35	300	0.36	1500	0.22
覆盖层	18.7	19.8	10	0.0	0.70	200	0.60	100	0.25	400	0.50
强风化泥岩	21.0	19.8				$E_0=0.5 \text{ GPa}, \nu=0.33$					
弱风化泥岩	25.0	26.5				$E_0=1.0 \text{ GPa}, \nu=0.3$					
微风化泥岩	25.5	28.8				$E_0=2.0 \text{ GPa}, \nu=0.27$					
强风化砂岩	22.0	28.8				$E_0=2.0 \text{ GPa}, \nu=0.28$					
弱风化砂岩	25.8	40.4				$E_0=6.0 \text{ GPa}, \nu=0.25$					
微风化砂岩	26.2	50.2				$E_0=12.0 \text{ GPa}, \nu=0.22$					
帷幕灌浆	20.5	25.0				$E_0=2.0 \text{ GPa}, \nu=0.27$					

各工况坝坡面分区复合土工膜的最大拉应变值见表 3。

表 3 I、II 区复合土工膜拉应变最大值

Table 3 Maximum value of tensile strain of composite soil membrane

工况	I 区	II 区
正常运用期	<6%	8.10%
设计洪水位	<6%	8.04%
校核洪水位	<6%	8.04%

## 2.2 复合土工膜选择

### (1) 部分国内外土工膜防渗工程

国内外部分土工膜防渗工程列于表 4、5。

表 4 部分国外土工膜防渗工程

Table 4 Some foreign geomembrane engineering

序号	工程名称与国家	使用年份	坝料	最大挡水头或坝高/m	土工膜材料	膜厚/mm
1	Terzaghi 加拿大	1962	土料	55.0	PVC	0.76
2	Atbashinsk 吉尔吉斯斯坦	1970	土料	46.5	PE	0.60
3	Nurek 围堰 独联体	1973	砂粒石	45.0	LDPE	0.60
4	La Coche 法国	1975	石料	33.0	PVC	1.00

表 5 部分国内土工膜防渗工程

Table 5 Some domestic geomembrane engineering

序号	工程名称(省、自治区)	使用年份	最大挡水头或坝高/m	土工膜防渗方式	膜厚/mm	土工膜类型
1	仁宗海(四川)	2007	56	斜墙	1.20	复合膜
2	李家箐(云南)	1988	30.6	斜墙	0.15	复合膜
5	小岭头(浙江)	1991	36*	斜墙	0.50	复合膜
6	甲日普(西藏)	1992	31.4*	心墙	0.25	复合膜
7	塘房庙(云南)	1997	52*	心墙	0.80	复合膜
8	博斯坦(新疆)	1998	50	斜墙	0.50	复合膜

### (2) 设计参数

本工程最大挡水水头 46.43 m, 防渗土工膜面积 37000 m<sup>2</sup>。

### (3) 复合土工膜选择

考虑坝体及坝基蓄水后沉降变形对复合土工膜的应力应变的影响, 本工程采用计入坝体坝基变形的有限单元法进行土工膜选择。

根据三维有限元计算成果和 GB50290—98《土工合成材料应用技术规范》、SL/T231—98《聚乙烯(PE)土工膜防渗工程技术规范》要求, 类比国内外相关工程, 初选膜厚 0.8, 1.0 mm 三种复合土工膜, 进行物理力学性质试验。根据试验成果, 按复合土工膜拉应变 8%时纵横向拉应力安全系数大于 5 要求, 参考国内主要生产厂家的产品技术指标, 综合确定本工程所需复合土工膜技术指标。复合土工膜主要技术指标要求见表 6。

## 2.3 周边连接与伸缩节

复合土工膜与坝脚连接板、溢洪道左导墙、坝顶防浪墙采用嵌入式连接, 其中坝脚土工膜嵌入连接板锚固槽二期混凝土中, 右侧土工膜嵌入溢洪道左导墙二期混凝土中, 坎顶防浪墙土工膜直接嵌入墙体混凝土中。

土工膜厚 1 mm, 结合本工程变形特性, 本工程采用半径 300 mm 的凹槽式伸缩节, 复合土工膜铺设在凹槽底部, 凹槽内用土工布填平同坡面, 坡面铺一层复合土工膜隔开中粗砂保护层与凹槽伸缩节内填塞的土工布。周边连接与伸缩节见图 2。

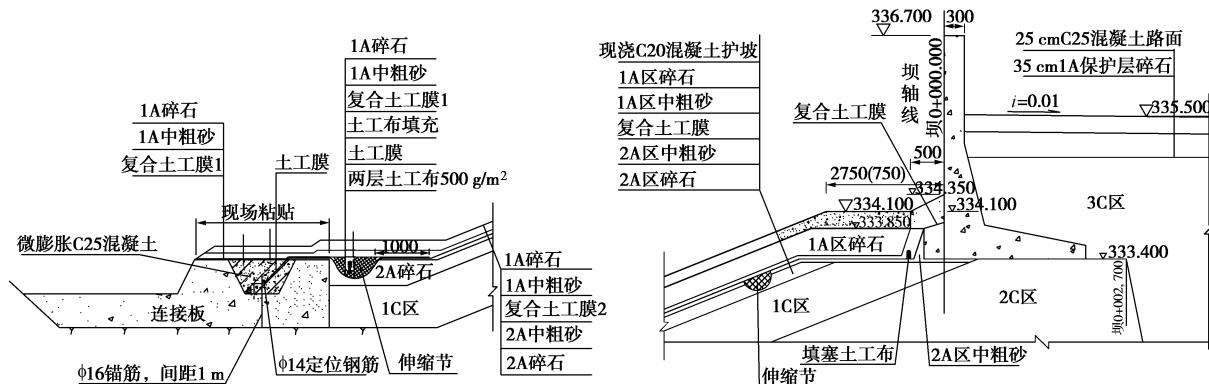


图2 周边连接与伸缩节图

Fig. 2 Peripheral connection and expansion joint

表6 长丝纺粘针刺非织造(HDPE)复合土工膜主要技术指标

Table 6 Filament spun bond non-woven acupuncture (HDPE) geomembrane main technical indicators

序号	项 目	单 位	指 标	规 范
1	单位面积质量	g/m <sup>2</sup>	≥2000	900 (膜)
2	复合土工膜厚度	mm	≥5.0	
3	土工膜厚度	mm	≥1.0	
4	纵横向断裂强度	kN/m	≥40	
5	纵横向标准强度对应伸长率	%	≥80	
6	CBR 顶破强力	kN	≥7.0	
7	圆球顶破强力	kN	≥4.5	
8	耐静水压	MPa	≥1.8	
9	剥离强度	N/cm	≥6.0	
10	纵横向梯形撕裂力	kN	≥1.1	
11	垂直渗透系数	cm/s	<10 <sup>-11</sup>	
12	与中粗砂间摩擦系数		≥0.53	
13	土工膜拉伸强度	MPa	≥30	12
14	土工膜断裂伸长率	%	≥500	300
15	土工膜直角撕裂强度	N/mm	≥110	40
16	在5℃土工膜 HDPE 弹性模量	MPa	≥70	70

### 3 土工膜施工

土工膜采用从下往上分段施工。摊铺时采用从上往下铺设。土工膜间纵横向连接缝均采用焊接, T型接头处进行圆片补疤焊增强。

#### (1) 土工膜拼接

a) 复合土工膜的拼接采用焊接方式, 土工布可用缝接方式或粘结方式。为确保拼接质量, 采用瑞士生产的双焊缝自动爬行焊接机和压出式焊枪。膜、布分离的土工布现场与膜粘结。

b) 土工膜采用热熔焊接方式, 施工前先做复合土

工膜的接头工艺试验。

c) 土工膜剪裁整齐, 保证足够的搭接宽度。在斜坡上搭接时, 将高处的膜搭接在低处的膜面上。

d) 拼接前对焊接面进行清扫, 用干净纱布擦拭焊缝搭接处, 做到无水、无尘、无垢; 土工膜平行对正, 适量搭接。

e) 土工膜拼接采用双缝焊, 焊缝双缝宽度采用2×10 mm。横向焊缝间错位尺寸应大于或等于500 mm。

f) T字形接头采用母材补疤, 补疤尺寸为300 mm×300 mm。修圆疤的直角。用挤压焊接机进行T字型结点补疤焊接。

g) 焊机工作温度为180℃~200℃, 根据气温和材料性能, 随时调整和控制焊机工作温度、速度。

h) 施工过程中发现出现的虚焊、漏焊, 采用切开焊缝, 使用热熔挤压机对切开损伤部位用大于破损直径一倍以上的母材补焊。

i) 焊接中, 及时将已发现破损的HDPE土工膜裁掉, 人工用单面刀片轻轻刮掉土工布, 根据实际裁掉土工膜大小情况进行补疤或接缝焊接。

#### (2) 复合土工膜与周边建筑物的连接

a) 复合土工膜与连接板、溢洪道左导墙的连接  
锚固用膜、布分离的HDPE土工膜埋入预留的锚固槽内, 锚固槽外膜、布采用现场粘结形成复合土工膜。

在锚固槽内预埋插筋, 将土工膜固定在插筋中下部, 再浇筑锚固槽二期混凝土, 锚固在混凝土中的土工膜与坝体防渗复合土连接。

复合土工膜固定在插筋上, 浇筑在锚固槽混凝土中, 不存在拉出锚固槽的问题。

#### b) 复合土工膜与防浪墙的连接

防浪墙为现浇结构, 复合土工膜与防浪墙采用锚固方式, 复合土工膜直接嵌入防浪墙内。复合土工膜

铺在防浪墙底部, 再上弯锚固在防浪墙墙体, 土工膜变形不会从墙体内拉出来。

### (3) 土工膜检测

土工膜焊接后, 对下列焊缝质量进行真空法检测: 全部焊缝、焊缝结点、破损修补部位、漏焊和虚焊的补焊部位、前次检验未合格再次补焊的部位等。

检测完毕后, 对检测时所做的充气打压穿孔全部用挤压焊接法补堵。

## 4 运行情况

工程于 2011 年 7 月 4 日下闸蓄水, 同年 7 月 30 日水位蓄至 331.50 m, 溢洪道溢流, 2012 年 4 月 22 日第二台机组并网发电。

水库初期蓄水时, 正值雨季, 降雨频繁, 下游坝坡马道以下发现渗水点, 主要分布在坝脚附近, 此时防浪墙底板以上坝体未填筑、坝顶未封闭, 部分渗水点是雨水渗入坝体所致。

大坝上、下游坝坡面平整, 未见沉陷、滑动变形。

## 5 结语

该电站属 III 等中型工程, 设计成果满足规程规范要求, 工程施工实行监理制, 施工质量合格。枢纽工程自下闸蓄水运行 4 年多来, 每年水库水位均蓄至正常水位以上, 溢洪道年年泄洪, 年发电量均大于设计指标。运行实体及安全监测成果表明, 土工膜斜墙堆渣坝工作性态正常, 满足设计与运用要求。

## 参考文献:

- [1] 王登科, 窦宝卿, 吕铭捷, 等. 复合土工膜防渗技术在小浪底水利枢纽配套工程——西霞院反调节水库中的应用[R]. 水利水电工程新技术推广研讨会, 2006. (WANG Deng-ke, DOU Bao-qing, LÜ Ming-jie, et al. The seepage control technique of composite geomembrane in Xiaolangdi Hydropower Dam Water Control Project - West Xia anti regulating reservoir[R]. New Technology Promotion Conference of Water Conservancy and Hydropower Engineering, 2006. (in Chinese))
- [2] 汤元昌, 王春喜, 万凯. 复合土工膜在王甫洲工程中的应用[J]. 中国水利, 1999(4): 36 - 37. (TANG Yuan-chang, WANG Chun-xi, WAN Kai. The application of composite geomembrane in Wangfuzhou project[J]. China Water Resources, 1999(4): 36 - 37. (in Chinese))
- [3] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 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. (Writing Committee of Handbook of Geotechnical Engineering Applications. Handbook for applications of geosynthetics in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [4] 顾淦臣. 复合土工膜土石坝的设计和计算[J]. 水利规划与设计, 2000(4): 49 - 56. (GU Gan-chen. The design and calculations of the composite geomembrane in earth rock dams[J]. Water Resources Planning and Design, 2000(4): 49 - 56. (in Chinese))

(本文责编 明经平)