

仁宗海水电站坝面复合土工膜防渗堆石坝设计

李 进 童建文

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 四川 成都 610072)

摘要:仁宗海水电站采用复合土工膜面板堆石坝,最大坝高 56 m,建在深厚覆盖层地基上。对其复合土工膜防渗体与基础混凝土防渗墙连接的综合防渗体系的设计与计算进行了介绍。工程实践表明:大坝结构设计合理,复合土工膜的安全系数能满足工程要求。

关键词:堆石坝;复合土工膜;深厚覆盖层;淤泥质壤土;仁宗海水电站

中图分类号:TV641.4 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2009)S1-0178-04

1 工程概况

仁宗海水电站位于四川省康定县和石棉县境内,是大渡河中游右岸支流——田湾河流域梯级开发的龙头水电站。整个工程主要由坝区枢纽、引水系统、厂区枢纽、“引田入环”输水枢纽等建筑物组成。复合土工膜坝体防渗堆石坝最大坝高约 56 m,坝顶长 843.87 m。水库总库容 1.09 亿 m³,电站装机 240 MW。

仁宗海水电站枢纽属二等大(2)型工程,工程区处于地震基本烈度为 7 度的构造基本稳定区,坝基为深厚覆盖层,堆石坝按 2 级建筑物设计,按基本烈度进行抗震设防。

2 坝址地形地质条件

仁宗海为第四系堰塞湖,呈 N60°~70°E 展布。坝址位于仁宗海海口上游约 400 m 处,河谷开阔呈“U”型,河道顺直,左岸山体浑厚,谷坡陡峻,地形较完整,右岸因干沟切割,山体较单薄。谷底宽约 680~720 m,左岸临湖,谷底右侧为干沟洪积扇,横河宽 400~600 m,分布高程 2 886~2 925 m,坡度约 5°。正常蓄水位 2 930 m 时,相应谷宽约 800 m。

坝址左右岸及河谷底部基岩由三叠系上统居里寺组第五岩段(T_{3j}⁵)的深灰色中厚层~巨厚层变质砂岩夹薄层板岩组成,岩石单轴湿抗压强度 120~148 MPa。谷底基岩顶面高程 2 748~2 761 m。

坝址河床由第四系松散堆积层组成,包括河床覆盖层及岸坡崩坡积层。河床覆盖层厚达 57~148 m,层次结构复杂,根据沉积环境及工程地质特

性自下而上分为 7 层:第①层(glQ₃¹),含孤、块碎石土,系冰川堆积,分布于河床底部,厚度 40~52 m,顶面埋深 80~100 m,结构密实。第②层(gl+fglQ₃²),块碎石土,系冰川冰水混合堆积,分布于河床下部,厚度 9~37 m,顶面埋深 49~67 m;结构较密实。第③层(lQ₃³⁻¹),青灰色粉质土层,系堰塞湖积,仅分布于河床左岸中部,呈透镜状展布,厚度 7 m,顶面埋深 60 m,结构较密实,透水性弱。第④层(fglQ₃³⁻²),含块碎砾石土,系横向干沟冰水堆积,分布于河床中上部,厚度 18~54 m,顶面埋深 10~51 m;其间随机分布的含块碎砾石砂层(或中细砂层)呈透镜状展布,结构较密实。第⑤层(al+fglQ₃³⁻³),碎(卵)砾石砂层,系环河冲积和干沟冰水混合堆积,仅分布于河床左岸中上部,厚度为 5~21 m,顶面埋深 8~31 m;中细砂,局部为砂质粉土;结构较密实。第⑥层(plQ₄¹),含块碎(卵)砾石土层,系干沟洪积物,分布于河床左岸上部和右岸浅表,厚度 8~31 m,顶面埋深 0~9 m,偶有砂层透镜体,其性状与④层的透镜体类似,结构较紧密。第⑦层(lQ₄²),灰色淤泥质壤土层,系湖积,仅分布于河床左岸顶部,厚度 4~20 m 不等,坝线附近横河方向宽 160~240 m;呈可塑状—软塑状,透水性弱。

岸坡崩坡积(col+dlQ₄²)块碎石土,结构松散,透水性强。主要分布于左岸 3 050 m、右岸 2 940 m 高程以下坝肩部位。右岸厚 4.6~20 m;左岸厚 7.0~47.2 m,向下游其厚度大于 124 m。

可见,堆石坝坝基覆盖层深厚、层次结构复杂。坝基主要持力层为第⑥、第⑤、第④层。第③、第⑦层透水性弱,但厚度小,分布范围窄,不能形成相对

隔水层,第⑦层力学特性差,存在地震液化问题,不能满足坝基变形及稳定要求,必须进行工程处理;其他土层厚度变化大,分布不连续,存在坝基(肩)渗漏和地基不均一等问题。

3 坝体设计

3.1 坝体结构

仁宗海水库堆石坝的坝型为复合土工膜坝体防渗堆石坝,坝顶高程 2934.00 m,最大坝高约 56 m,坝顶宽 8.00 m。

坝体上游面 2891.50 m 高程处设一 15 m 宽的检修平台,平台以上坝坡为 1:1.8,坝体采用坝面复合土工膜防渗,防渗最大高度 44 m;平台以下坝体采用混凝土防渗墙防渗,坝坡为 1:2.0。大坝下游坝坡为 1:2.0,并在 2904.00 m 高程设一宽 4 m 的马道,坡脚处设宽为 80 m 的压重平台,顶高程为 2895.00 m。

复合土工膜为两布一膜,规格为 400 g/m²/HDPE 1.2 mm/400 g/m²,其表面用厚 12 cm 的预制混凝土扣板保护,其下为厚 6 cm 的无沙混凝土垫层,之后为水平宽 3.00 m 的坝体垫层区,再后为坝体堆石区,坝体堆石区又分为坝轴线上游的主堆区 II 区和坝轴线下游的次堆区为 I2 区,防渗墙后坝基范围均铺厚 1 m 的反滤层,堆石区与反滤层之间设厚 2 m 的过渡层(II 区)。

复合土工膜下部与混凝土防渗墙相接,上部与防浪墙连接,混凝土防渗墙采用悬挂式,最大墙深约 82 m,墙厚 1.0 m。复合土工膜与岸坡通过趾板连接,趾板水平宽为 3.5 m,厚 0.60 m。堆石坝典型剖面见图 1。

3.2 筑坝材料及填筑标准

3.2.1 坝体堆石料

为尽量减轻工程建设对环境的影响,大坝坝体堆石料全部采用天然砂砾石料,主要源于干沟崩坡

积体料和干沟天然砂卵石料。崩坡积体料表层粗粒较多,细粒含量较少;里面细粒较多,粗粒较少;因此,在料源开采和上坝过程中应进行适当掺和。天然砂卵石料级配较好,抗剪强度指标和模量较高,是筑坝材料的首选料源,但水下开采部分较多,含水量不易控制,且该料场大部分已被施工道路所占。因此,根据料源的分布、开采方式对环境、施工进度的影响,通过对崩坡积体料的物理力学性能、渗透试验和高压大三轴试验研究以及现场碾压试验,确定将干沟崩坡积体料作为坝体的主堆料置于 II 区和 I2 区;干沟天然砂卵石料作为过渡料置于坝基 II 区。

3.2.2 坝体垫层料、反滤料和细料

坝体垫层料采用坝址附近的混合土卵石料加工而成,反滤料采用界碑石附近的河床天然砂卵石料加工而成,位于趾板附近区域的细料区料采用干沟崩坡积体料加工而成。

根据坝料前期碾压试验及生产性碾压试验成果,结合室内试验成果和坝体结构要求,确定筑坝材料设计指标和碾压参数,见表 1。

表 1 各种坝料填筑标准特征

坝料名称	设计干密度/ (g·cm ⁻³)	设计孔隙率/%	铺料厚度/ cm	最大粒径 ≤/mm	控制填筑含水率/%	碾压遍数/ 遍
I ₁ 区干沟崩坡积体料	≥2.08	<23	80	400	1.8~2.2	10
I ₂ 区干沟崩坡积体料	≥2.08	<23	80	600	1.8~2.2	10
II区干沟天然砂卵石料	≥2.20		100	800	3.2~3.5	10
垫层料,仁宗海混合土卵石料加工	≥2.28	<20	40	80	11~12	8
反滤料,人工砂石料	≥2.15		50	40	3.1~3.6	8
细料区料	≥2.20	<19	20	40		8

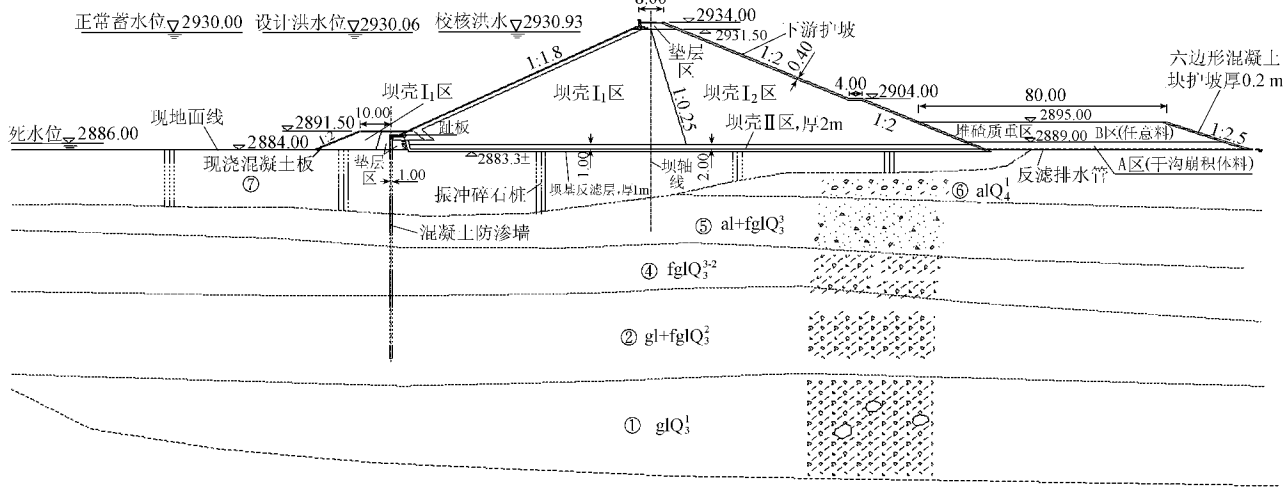


图 1 堆石坝典型剖面

4 坝基处理及防渗系统

4.1 坝基处理

堆石坝坝基覆盖层最深达 148 m ,第⑥、第⑤、第④层为主要持力层 ,承载力为 0.30 ~ 0.60 MPa ,变形模量 25 ~ 50 MPa ,满足堆石坝坝基稳定和变形要求。第③层虽承载力低 ,但埋深大、厚度小、分布范围小 ,对坝基变形影响不大 ,对该层也不作工程处理。

坝基第⑦层为湖积灰色淤泥质壤土 ,属液化土。室内试验成果 $E_s = 4.28 \sim 8.04 \text{ MPa}$, $C = 0.035 \sim 0.06 \text{ MPa}$, $\varphi = 6.1^\circ \sim 10.8^\circ$, $K = (12.9 \sim 5.4) \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,表明其力学特性差 ,透水性弱 ,不能满足坝基变形及坝坡抗滑稳定要求 ,必须进行加固处理。由于淤泥质壤土开挖及开挖后的堆放都有一定难度 ,而且堆放后可能造成水土流失 ,污染河道 ,对环境保护和水土保持不利 ,因此 ,对该层采取振冲碎石桩加固处理 ,形成复合地基。

为满足堆石坝的变形、基础固结和稳定要求 ,通过现场不同功率振冲器、不同布桩间距的振冲对比试验 ,确定振冲处理后复合地基的技术指标 :采用功率不小于 75 kW 的振冲器 ;面积置换率达到 40% 以上 ;平均密度大于 2.10 g/cm^3 ;平均孔隙率小于 0.30 ;变形模量大于 35.0 MPa ,压缩系数 $\alpha_{100 \sim 200(\text{kPa})} \leq 0.25 \text{ MPa}^{-1}$;内摩擦角 $\varphi \geq 30^\circ$,凝聚力 $C \geq 25 \text{ kPa}$ 。经计算分析认为 ,对第⑦层淤泥质壤土进行振冲加固处理后 ,能够满足建堆石坝的要求。

振冲处理范围 :平面上为整个坝基范围和坝体上游坡脚外计算滑弧以内的第⑦层进行处理 ;立面上处理深度至第⑦层以下约 0.5 m ,最大深度约 21 m。振冲碎石桩按等边三角形布置 ,防渗墙上、下游各 10 m 范围内桩间距为 $1.3 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$,其余部位桩间距为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,振冲桩的平均桩径为 1.15 m。振冲碎石桩填料采用饱和抗压强度大于 40 MPa 的无腐蚀性和性能稳定的硬质石料加工 ,最大粒径不超过 150 mm ,不含小于 5 mm 颗粒 ,碎石料级配连续。坝基振冲面积达 60000 m^2 ,布置振冲碎桩 31 295

根 ,桩总长 474 280 m。

4.2 防渗系统

4.2.1 坝基及两岸防渗

坝基深厚覆盖层土体透水性较大 ,其中第⑥层属中强透水层 ,第⑤、第④、第②、第①层为中等透水层 ,第⑦、第③层属弱透水 ,但厚度小、分布窄 ,不能形成坝基相对隔水层。经多方案三维渗流分析计算综合比较 ,选择坝基防渗处理采用悬挂式混凝土防渗墙 ,墙厚 1.0 m ,最大深度 82 m ,两岸坝肩岩体结构松弛 ,具强、弱—中等透水 ,采用帷幕灌浆进行防渗处理 ,帷幕设两排 ,孔距 2.0 m ,排距 1.5 m。

选定方案坝基各层内的渗透坡降绝大部分均小于相应允许坡降 ,仅局部区域大于临界坡降 ,但都远小于破坏坡降 ,总渗流量仅占河道枯期平均来流量的 0.62% ,满足渗流控制要求。

4.2.2 坝体防渗

田湾河流域防渗土料匮乏 ,运距较远(距坝址约 30 km) ,储量不足 ,加之工程区对环境保护和水土保持设计要求高 ,因此 ,经多方案综合比较 ,坝体防渗采用明浇钢筋混凝土防渗墙 + 复合土工膜的综合防渗型式。

复合土工膜用于堆石坝坝体作为永久防渗是一种新型防渗形式 ,目前工程实例较少 ,而且挡水水头较高 ,接头形式较多。为保证防渗结构的可靠性 ,根据工程布置特点和仁宗海坝址处的气候特征 ,对复合土工膜的应力及变形专门作了计算分析 ,并通过试验测定不同厂家、不同规格复合土工膜的物理性能、力学性能、水力学性能和耐久性能 ,选定复合土工膜的材料、类型和规格 ,根据坝体应力及变形计算成果 ,研究复合土工膜的接头形式 ,以及与其他防渗体的连接方式和复合土工膜的上、下防护层形式 ,同时复核复合土工膜在施工期的稳定性。经综合比较并结合现场施工条件 ,确定仁宗海堆石坝复合土工膜规格为 $400 \text{ g/m}^2/\text{HDPE } 1.2 \text{ mm}/400 \text{ g/m}^2$,其材料设计性能指标见表 2。

表 2 堆石坝复合土工膜设计技术指标

物理特性		力学特性						水力特性		
单位面积 质量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度 (2 kPa)/ mm	条样拉伸				梯形撕裂强度/ kN		CBR 顶 破强度/ kN	抗渗强度	
		断裂强度/($\text{kN} \cdot (5\text{ cm})^{-1}$)		断裂伸长率/%						
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向		膜材/ MPa	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
$>1900^{④}$	$>6.0^{⑤}$	$3.3^{⑥}$	$3.1^{⑥}$	$30 \sim 100^{⑥}$	$30 \sim 100^{⑥}$	$>1.2^{⑦}$	$>1.3^{⑦}$	$>5.1^{⑧}$	$>2.0^{⑥}$	$<5.0 \times 10^{-12⑥}$

注 ①产品名称为密度聚乙烯复合土工膜 ,土工布采用长丝土工布 ;②规格型号为 $400 \text{ g/m}^2/\text{HDPE } 1.2 \text{ mm}/400 \text{ g/m}^2$;③复合土工膜应具有良好的耐久性和低温韧性 ;④参照 GB/T 13762—1992 ;⑤参照 GB/T 13761—1992 ;⑥参照 SL/T 235—1999 ;⑦参照 GB/T 13763—1992 ;⑧参照 GB/T 14800—1993。

表 3 邓肯 E-v 模型计算参数

名 称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}
覆盖层①	13.5	38	0	0.70	900	0.12	0.26	0.02	3.8	1400
覆盖层②	13.5	35	0	0.68	800	0.14	0.25	0.03	3.7	1500
覆盖层④	12.5	33	0	0.75	550	0.43	0.33	0.002	3.0	1050
覆盖层⑤	12.5	32	0	0.73	650	0.21	0.30	0.008	3.6	1000
覆盖层⑥	13.0	35	0	0.80	630	0.43	0.34	0.002	3.0	950
振冲复合地基	12.0	28	0	0.8	450	0.43	0.36	0.002	3.2	850
压重料	20	23	10	0.88	800	0.50	0.25	0	0	1500
堆石Ⅰ区	21.0	40	10	0.75	800	0.36	0.30	0.02	5.4	1600
堆石Ⅱ区	21.5	42.6	0	0.750	1100	0.25	0.32	0.03	3.1	2000
反滤料	21.75	40	0	0.685	800	0.34	0.258	0.006	5.05	1200

5 坝体及复合土工膜应力、应变计算

5.1 计算工况及参数

仁宗海水电站复合土工膜坝体防渗堆石坝三维有限元应力、应变计算考虑了坝体设计成果,计算工况为施工期、施工完建期、蓄水期和地震工况,计算对施工及施工完建期的坝体填筑和蓄水期蓄水过程进行了详细模拟,共分 19 级加载。

三维有限元计算采用改进的邓肯模型来描述土石料的应力应变关系,混凝土材料和基岩按线弹性材料考虑。坝体、坝基材料计算参数见表 3。

5.2 应力、应变分析成果

a. 堆石体及坝基的变形。各种工况下,坝体及坝基部位土石料的应力水平均小于 1.0,说明坝体及坝基不会出现破坏区域。施工完建期大坝堆石体最大沉降为 85.9 cm,位于 0+248.0 剖面的建基面坝轴线附近 2895.00 m 高程,堆石体沉降率为 0.61%。

b. 防渗墙的变形和应力。施工完建期防渗墙最大水平位移向上游为 19.1 cm,位于左岸坝高较大的范围内,最大沉降向下 14.2 cm。蓄水期防渗墙最大水平位移向上游为 7.0 cm,最大沉降向下 28.6 cm。施工完建期防渗墙大主应力最大值位于左岸部位墙体底部,其值为 14.3 MPa;小主应力最大值为 1.7 MPa,两岸防渗墙顶部出现一定的拉应力区,最大拉应力值为 -0.9 MPa。校核洪水位时大主应力最大值为 27.1 MPa;小主应力最大值压应力为 6.6 MPa,最大拉应力值为 -4.1 MPa。

c. 复合土工膜的变形和应变。复合土工膜属柔性材料,自身具有一定的抗拉能力,其变形是铺设完后在运行期受水压力作用导致坝体变形而产生的从属变形,进而产生一定的应变和拉力,因此,坝面的应变即可认为是土工膜的应变。复合土工膜的变形主要表现为向下游的变形和向下的沉降变形,最大顺河向水平位移为 17.5 cm,最大沉降为 -21.7 cm,均发生在上游坝面偏左岸的复合土工膜

受最大水压力附近区域,在坝轴向位移总体上由河岸两侧向河床部位变形,最大值为 3.4 cm。

由于复合土工膜自身刚度较低,抵制坝体变形的能力微弱,其变形主要是跟随坝体变形而产生的从属变形,因此,复合土工膜的最大拉应变并不在河床部位,而是在两岸部位,正常运行工况下复合土工膜的最大拉应变值为 -0.509%,位于左岸上游坝坡面底部;正常蓄水位+地震”工况下最大拉应变值为 -0.506%,大致位于左岸上游坝坡面底部。

5.3 应力、应变分析结论

a. 大坝堆石料和覆盖层采用改进的邓肯 E-v 模型计算得出堆石体变形和应力状态总体上较好,大坝结构设计合理。

b. 库水对堆石体位移和应力的影响主要是坝轴线上游侧的垫层、过渡层及主堆石区,对下游侧次堆石区的影响不明显。

c. 蓄水前后混凝土防渗墙的变形大小、分布规律和变形趋势均是合理的。

d. 复合土工膜的纵、横向应变安全系数和拉力安全系数均满足大于 5.0 的要求。

6 结 语

仁宗海水电站复合土工膜防渗堆石坝坝高 56 m,承受如此高挡水水头的复合土工膜防渗堆石坝在国内永久工程中还很少应用,在经工程处理后的较厚淤泥质壤土基础上建造堆石坝在国内永久工程中更为少见。工程的关键是在复杂地质构造背景以及更高设计要求下,合理利用和运用各种处理措施,解决好坝体结构和基础处理问题,从而保证了工程的安全和工期要求。

目前,坝体施工已基本完成。水库已于 2008 年 10 月开始蓄水,最高蓄至 2 904 m 水位后,由于下游梯级电站需要,开始放水。监测结果表明,坝体变形及渗流均在正常范围内。

(收稿日期 2009-09-02 编辑:马敏峰)