

有限元法在大坝渗流性状分析中的应用

李少明 张琳 田小平

(温州市水利电力勘测设计院, 浙江 温州 325011)

摘要 针对仰义水库主坝的复杂渗流条件, 采用有限元法, 结合量水堰观测资料及主坝钻探资料, 对其渗流性状进行分析, 得出主坝渗流稳定方面的结论, 并提出了相应的措施和建议。

关键词 水力学; 渗流; 有限元法; 浸润线; 水位骤降

中图分类号 TV139.1

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2006)S1-0057-04

SL274—2001《碾压式土石坝设计规范》^[1]规定“对 1 级坝、2 级坝和高坝应采用数值法计算确定渗流场的各种渗流因素。对其他情况可采用公式进行计算。对地质复杂的情况, 可采用反算方法校核和修正各项水文地质参数。”人们常侧重对 1 级坝、2 级坝和高坝进行数值计算, 对中低坝的数值计算不太重视。然而, 很多中、低坝建设年代较早, 运行过程中一般都经过多次加高加固, 坝体填土分区复杂, 不同时期填土物理参数也相差较大, 公式计算很难得到理想的结果, 因而需采用数值计算的方法进行计算。本文介绍有限元技术在仰义水库主坝渗流分析中的应用情况。

1 工程概况

仰义水库位于温州市仰义乡, 属瓯江流域, 坝址以上集雨面积 11.5 km², 水库总库容 1 151 万 m³。该水库以灌溉、防洪为主, 工业及生活用水等综合利用为辅。其下游有 104 国道、金丽温高速、金温铁路和中国鞋都, 人口密集, 防洪地位重要。水库设计正常蓄水位 74.8 m (减去 2.56 m 为黄海高程, 下同), 100 年一遇设计洪水位 77.32 m, 相应的库容为 1 092 万 m³; 2000 年一遇校核洪水位为 78.10 m, 相应的库容为 1 151 万 m³。水库枢纽建筑物有主坝 1 座、副坝 1 座、溢洪道 1 座、输水隧洞 1 条、水库主坝高 40 m, 坝顶高程 80.0 m。

主坝最早于 1955 年冬兴建, 1956 年完成高 18 m、顶宽 4 m 的均质土坝, 坝下设有放水小涵洞, 断面为 0.8 m × 1.2 m。1959 年开始进行二期扩建, 1962 年冬完工, 坝高由 18 m 增加到 39.5 m, 坝顶长

105 m, 为黏土斜墙坝, 坝体由砂壤土、堆石组成。坝内增设 1 条大涵洞, 洞长 151 m, 断面 1.2 m × 2.6 m (净)。由于工程施工质量差, 随后对土坝质量进行检测并采取了加固措施, 增设了大坝观测设备。第四期(保坝)工程 1979 年开始, 至 1985 年结束, 大坝坝顶增建了 1 m 高的防浪墙。大坝上下游坝坡抛石、砌石加固。现状上游 40.0 ~ 52.5 m 边坡 1:2.5, 52.5 ~ 65.0 m 为 1:3.5, 65 m 以上为 1:2.0, 下游坡坝脚坡度为 1:1.7, 上部坝坡为 1:2.0。主坝现状渗流观测设施有坝下量水堰。

2 主坝施工质量

2.1 坝基地质

主坝坝址处两岸山体不甚对称, 左岸相对单薄, 坡度在 40°左右, 右岸坡度在 35°左右, 坝址处河床及两岸山体基岩出露, 覆盖层较薄, 呈构造剥蚀地貌。

坝基主要坐落于紫灰酸性熔结凝灰岩上, 局部基岩裸露, 风化程度低, 呈弱风化状态, 风化壳较薄, 新鲜岩体致密坚硬, 岩石强度等级在 10 ~ 12 级之间。无影响坝肩稳定的区域性及非区域性断层通过, 坝体稳定性较好, 局部小构造以裂隙、节理为主, 对坝址影响较小。2003 年的地质勘察资料表明坝基上段透水率为 8.3 ~ 8.9 Lu, 属弱透水性, 含等价开度 0.05 ~ 0.01 mm 裂隙, 左右坝肩存在绕坝渗漏的可能。

2.2 坝体质量

主坝主河床段施工中清基比较彻底, 根据主坝竣工报告, 山坡坡积层与大坝接头未妥善处理, 形成了疏松的渗漏带。2003 年 10 月的钻孔试验资料表明, 主坝斜墙部分填土为黏土夹砂, 最大干密度为

1.54 g/cm³, 平均干密度为 1.35 g/cm³, 平均压实度仅为 0.88, 远低于现行规范要求的 0.96 ~ 0.98 范围。水平渗透系数 $K_h = 2.19 \times 10^{-4}$ cm/s, 垂直渗透系数 $K_v = 1.74 \times 10^{-4}$ cm/s, 不能满足现行规范要求斜墙渗透系数不大于 10^{-5} cm/s 的规定。斜墙土料抽样分散性土的比例为 9.1%, 不符合规范要求。

主坝坝壳料为含角砾黏土和含碎石黏土, 最大干密度 1.61 g/cm³, 平均干密度为 1.38 g/cm³, 平均压实度为 0.86, 不满足规范要求的 0.96 ~ 0.98 范围。含角砾黏土和含碎石黏土的主坝坝壳料渗透系数标准值分别为 $K_h = 1.71 \times 10^{-4}$ cm/s, $K_v = 1.25 \times 10^{-4}$ cm/s 和 $K_h = 2.08 \times 10^{-4}$ cm/s, $K_v = 1.06 \times 10^{-4}$ cm/s。

主坝原老坝均质坝体填料平均干密度为 1.36 g/cm³, 最大干密度为 1.54 g/cm³, 土样压实度 0.90 ~ 0.98 的占 60%, 大于 0.98 的占 5%, 其余均小于 0.90, 平均压实度为 0.845, 渗透系数分别为 $K_h = 8.53 \times 10^{-5}$ cm/s, $K_v = 1.02 \times 10^{-4}$ cm/s, 土料为过渡性 ~ 分散性土, 均不满足规范要求。

2.3 反滤层、排水设施及护坡施工质量

主坝设计反滤层为 3 层, 第 1 层为粗砂, 厚 25 cm, 第 2 层为碎石, 厚 30 cm, 第 3 层为小卵石砾石, 厚 45 cm。据竣工报告记载: “反滤层厚度未按设计要求填筑, 靠左岸山坡偏下游处有 100 余 m² 未铺设反滤层”。2003 年 10 月钻探的位于主坝坝顶和下游坝坡的 4 个孔均未揭露反滤层, 说明施工时反滤层很薄或局部未设反滤层。

主坝排水设施为堆石褥垫和棱体排水, 堆石体密度为 2.3 g/cm³, 岩石密度为 2.7 g/cm³, 孔隙率为 17.4%, 接近规范要求的孔隙率宜为 20% ~ 28% 的范围。渗透系数 0.8 ~ 1.0 cm/s, 为强透水层, 排水效果良好, 满足规范要求。

3 渗流监测资料分析

仰义水库主坝在 1964 年设有量水堰, 因受外水影响, 运行不久即停测。现有观测资料为 1994 年 7 月至 2003 年 12 月近 10 年的观测资料。为减少雨天的雨水影响, 将雨天资料剔除(个别极高水位资料保留), 再将连续 3 d 不下雨后的过堰流量与库水位作相关分析, 结果见图 1。

a. 从主坝渗流量过程线可知, 渗流量过程线与库水位过程线基本同步升降, 非汛期库水位降落时渗流量过程线稍有滞后, 符合大坝渗流的基本规律。

相关线共 6 条, 分别为 1994 ~ 1995 年度、1996 ~ 1997 年度、1998 ~ 1999 年度、2000 ~ 2001 年度、2002 ~ 2003 年度以及 1994 ~ 2003 年度总相关线。水位较高时, 相关线略向流量坐标轴弯曲, 说明主坝渗流

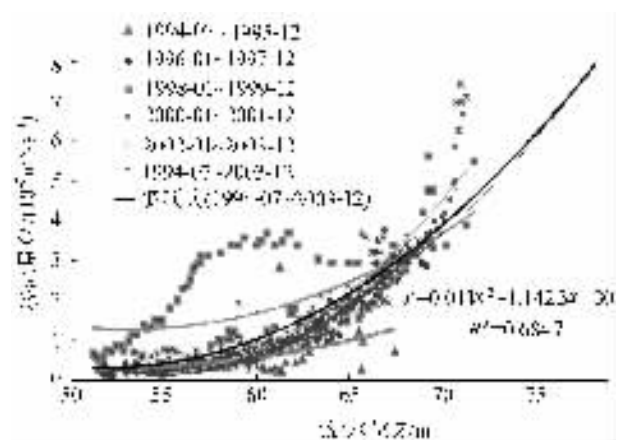


图 1 主坝渗流量相关线

量与水位不完全呈线性关系。

从各年的相关线来看, 1994 年 7 月至 1995 年 12 月渗流量较小, 运行水位也较低, 其余年份在相同水位情况下的渗流量均比 1994 年 7 月至 1995 年 12 月的大, 除 1998 年 1 月至 1999 年 12 月外的 6 年, 其渗流量随年份的变化不明显, 总体比较稳定。1998 年 1 月至 1999 年 12 月的数据点与其他年份的明显不同, 在库水位 52.0 ~ 67.0 m 之间呈两段弧形组成梭形圈套, 构成圈套的下部弧形数据点分布与其他年份的数据分布规律基本相似, 其上部弧线渗流量则明显高于其他年份, 且集中在 1998 年 6 ~ 12 月间, 原因可从以下几方面加以分析: ① 蚁穴贯通斜墙。仰义水库曾在 1990 年 10 月至 1991 年 2 月、1999 年 10 月至 2000 年 1 月进行过 2 次灭蚁工作, 所发现的蚁巢、蚁穴基本在经常运用水位以上, 65.00 m 高程以下未发现。但不能完全排除蚁穴贯通造成渗流量增大, 而又因塌陷堵住蚁穴造成随后渗流量又减小的可能性。② 大坝内部管涌。根据 2003 年地质钻探资料^[3], 部分土体的不均匀系数 $\eta > 20$, 为管涌土, 可能会发生管涌, 有可能发生坝内管涌破坏, 随后发生塌陷时管涌形成的通道又被堵塞, 从而使渗流量先增大而后再减小。综合上述, 1998 年下半年的渗流异常可能是由蚁穴贯通或大坝内部管涌造成。大坝堆石体与坝体填土接触面的反滤层质量差或未实施铺设反滤层都为此提供了可能。另外, 2003 年钻探时, 下游堆石体内水位高于基岩面 2 ~ 3 m, 有可能使坝体中的土粒被渗水带入堆石体内, 并逐渐沉积下来, 致使堆石体排水不畅, 坝内水位上升。目前尚无坝坡明显塌陷的记录可证实这一点。

b. 通过主坝渗流量相关线可以看出, 随库水位升高, 在 63.00 ~ 65.00 m 左右相关线有折点, 说明坝体或两岸在此高程附近增加了新的渗漏进口, 2003 年地质勘察资料也表明该高程以上坝体部位的渗透系数比下部大。通过相关曲线得到不同库水

表 1 仰义水库、钟前水库渗流量比较

水库名称	坝底 高程/m	坝顶 高程/m	坝顶 长/m	低水 位/m	流量/ ($10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	正常 洪水位/m	流量/ ($10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	设计 洪水位/m	流量/ ($10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	校核 洪水位/m	流量/ ($10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
钟前水库	80.00	131.45	184	100	0.15	123.5	5.2				
仰义水库	40.00	80.00	106	60	0.8	74.8	6.1	77.32	7.3	78.1	8.2

位时的渗流量见表 1,与同类型坝(钟前水库(岩基))相比总体渗流量稍偏大。

4 主坝渗流计算

仰义水库主坝填土分区复杂,运用水力学或流体力学公式计算不可能获得坝体浸润线、渗透坡降等数据,需采用电拟试验或有限元法计算,故采用河海大学开发的软件 Autobank V4.0 进行有限元计算。

4.1 计算参数和工况

4.1.1 计算参数

根据地质勘察报告提供的土体、岩性参数,参考类似工程经验,各土层的渗透系数取值如表 2 所示。计算中,干砌石贴坡排水同坝脚堆石,坝基基岩弱透水层视为透水层,微透水层视为不透水层。

表 2 主坝渗流计算各土层参数

各部位 土层	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		孔隙 比 e	折减 系数 $\alpha/\%$	孔隙 率 n	给水 度 μ
	K_h	K_v				
斜墙： 黏土夹砂	2.19×10^{-4}	1.72×10^{-4}	0.982	6.35	0.495	0.0315
坝壳上部： 含角砾黏土	1.58×10^{-4}	1.20×10^{-4}	0.957	5.28	0.489	0.0258
坝壳下部： 含碎石黏土	1.34×10^{-4}	1.06×10^{-4}	0.948	5.33	0.487	0.0259
原小坝： 黏土夹砂	8.36×10^{-5}	1.02×10^{-4}	0.955	3.85	0.488	0.0188
堆石块石	1.00	1.00		72.31	0.148	0.1070
坝基 微风化 熔结凝灰岩	7.36×10^{-5}	7.36×10^{-5}				

4.1.2 计算工况

a. 稳定渗流:考虑本水库集雨面积小,洪水历时短,高水位不能形成稳定渗流。①水库水位为正常水位 74.8 m,主坝下游水位取 32.0 m;②水库水位为平均水位 60.0 m,下游水位取 32.0 m。

b. 非稳定渗流 ①水库水位自校核洪水位 78.1 m 骤降至 55.0 m (1/3 坝高); ②水库水位自正常水位 74.8 m 正常消落至平均水位 60.0 m。

4.2 计算成果

a. 稳定渗流: 将主坝断面的几何及物理力学参数按规定输入计算机内, 得出结果见表 3。

表3 主坝稳定渗流计算结果

计算 工况	老小坝与坝 基接触面 渗透坡降	坝体内沿 浸润线 渗透坡降	下游出口 段最大 渗透坡降	单位渗透 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{m})^{-1}$	斜墙浸润 线渗出点 高程/m
正常 水位	0.457 ~ 2.36	2.36 ~ 5.59	0.349	4.65×10^{-4}	68.28
平均 水位	0.497 ~ 1.51	1.51 ~ 2.25	0.339	1.68×10^{-4}	

注:主坝渗出点为斜墙。

主坝的两种计算工况的浸润线、等势线和水力坡降见图 2~5。

b. 非稳定渗流:库水位降落速度对第 1 种工况经调算,由校核洪水位 78.1 m 骤降至 55.0 m 需 338 h,第 2 种工况库水位正常消落约 10 cm/d。

按以上参数,由 Autbank V4.0 程序计算得到 2 种工况时的主坝斜墙中自由水面线位置如图 6 所示。

4.3 计算结果分析

4.3.1 渗漏量分析

根据所计算的断面在上述 4 种工况下的计算结果可以看出：

a. 所计算断面的水位越高则渗漏量越大。

b. 主坝在库水位 60.0m 和 74.8m 时,分别按坝长折减系数 0.45 和 0.50 估算得全坝段的渗漏量为 $2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $24.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,与量水堰实测资料及其外延数据成果相比规律一致,但比量水堰成果值偏大,分别为其 2.6 倍和 4.0 倍。原因可能有三方面:①量水堰基础漏水,部分渗水未截住;②实

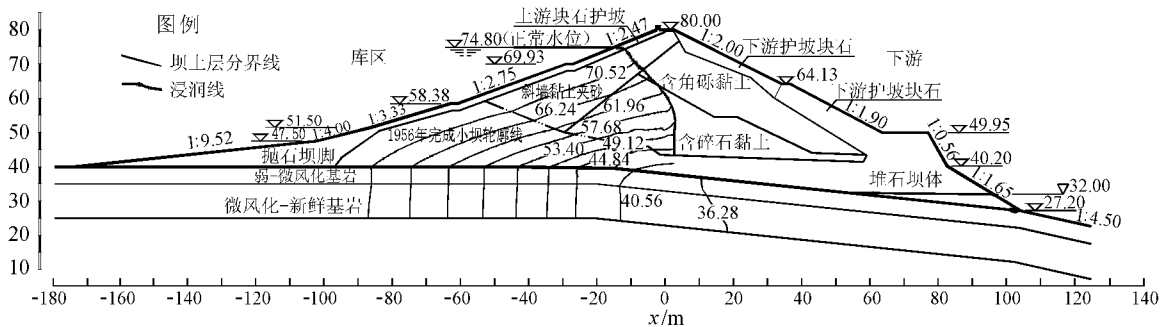


图2 主坝渗流等势线(正常水位)(单位:m)

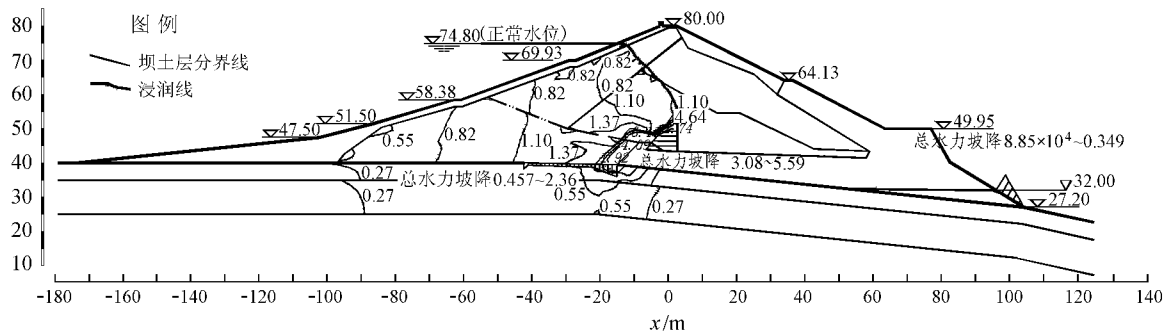


图3 主坝渗流水力坡降(正常水位)单位:m

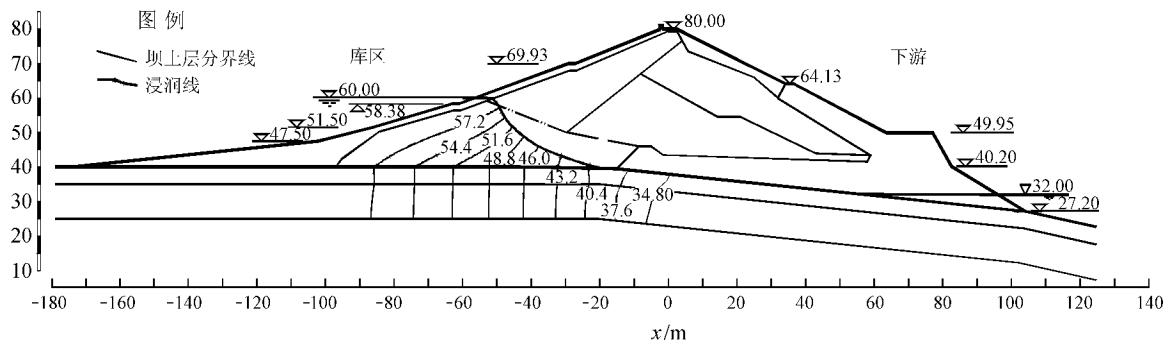


图4 主坝渗流等势线(水位60.00m)单位:m

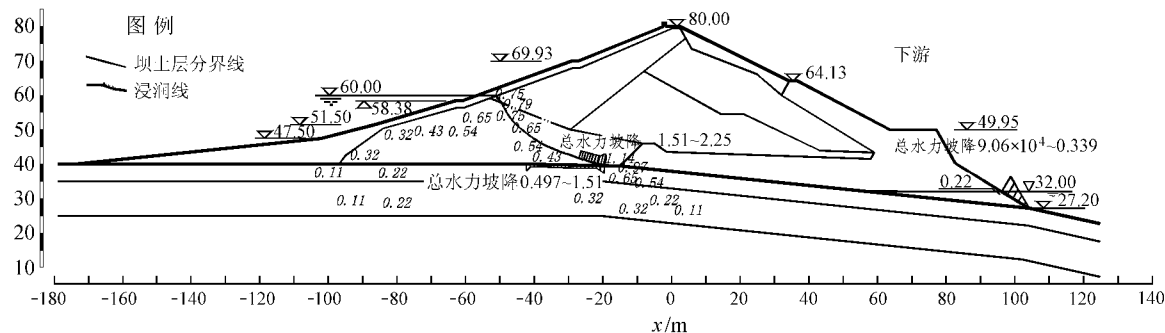


图5 主坝渗流水力坡降(水位60.00m)单位:m

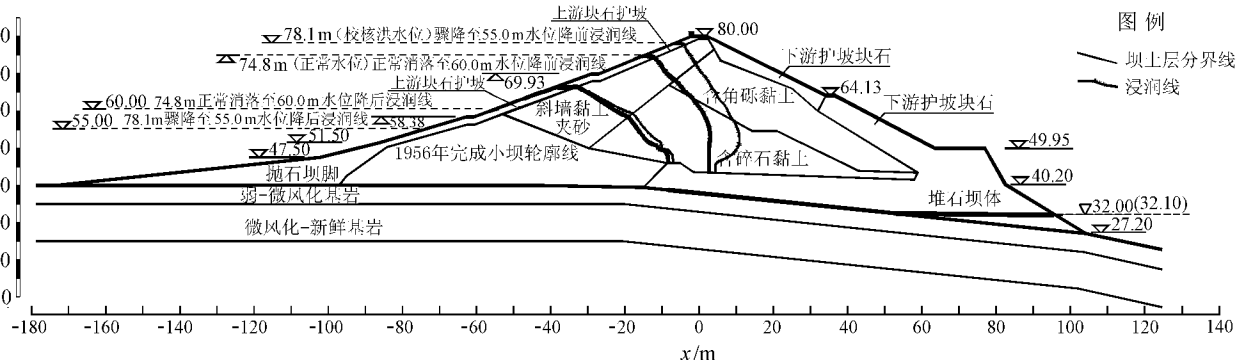


图6 库水位降落主坝浸润线

际库水位一直较低,高水位未形成稳定渗流,而有限元计算按稳定渗流计算,③有限元渗流中地质资料提供的渗透系数值比实际值偏大。

c. 大坝单位渗漏量范围在 $1.68 \times 10^{-4} \sim 4.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 之间,经估算,大坝全年的理论渗漏水量在 6.5 万 m^3 左右,约占全年来水的 0.5%,比例不是很大。

d. 大坝存在的漏渗并未在运行中有所反映,原

因在于渗漏水通过下卧的透水岩体潜排至下游。

4.3.2 渗透稳定分析

a. 表3列出了黏土斜墙与坝壳内的总渗透坡降、坝坡出逸坡降和斜墙与岩基面之间接触渗透坡降。允许坡降无试验资料,根据工程经验和有关土石坝设计手册取用:黏土与岩体间的允许接触渗透坡降为 1.25~2.5,斜墙、坝壳内部坡降为 5~10,出逸坡降为 0.3~0.5。(下转第 183 页)

究 D]. 汕头 汕头大学 2002.

[2] 李湘洲 , 王伟 . 碳纤维增强混凝土的现状与趋势 [J]. 混凝土 2000 (8) 31-33.

[3] FU Xu-li , LU Wei-ming , CHUNG D D L. Ozone treatment of carbon fiber for reinforcing cement [J]. Carbon , 1998 , 36 (9) : 1337-1345.

[4] WEN Si-hai , CHUNG D D L. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement [J]. Cement and Concrete Research , 2001 , 31 (4) : 141-147.

[5] 毛起焰 , 赵斌元 , 沈大荣 , 等 . 极化效应对碳纤维增强水混 (CFRC) 导电性的影响 [J]. 材料研究学报 , 1997 , 11 (2) : 195-198.

[6] 魏小胜 , 肖莲珍 , 李宗津 . 采用电阻率法研究水泥水化过程 [J]. 硅酸盐学报 2004 , 32 (1) 34-38.

[7] 唐祖全 , 钱觉时 , 李卓球 . 接触电阻对导电混凝土电热特性的影响 [J]. 混凝土与水泥制品 2003 (4) : 10-13.

[8] WEN Si-hai , CHUNG D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a thermistor [J]. Cement and Concrete Research , 1999 , 29 (2) 961-965.

[9] 韩宝国 , 关新春 , 欧进萍 . 碳纤维水泥石电阻测试方法研究 [J]. 玻璃钢/复合材料 2003 (6) 6-8.

[10] 毛起焰 , 赵斌元 , 沈大荣 , 等 . 水泥基碳纤维复合材料压敏性的研究 [J]. 复合材料学报 , 1996 , 13 (4) 8-11.

[11] 陈兵 . 碳纤维水泥基复合材料机敏性能研究 [D]. 上海 同济大学 2002.

[12] 唐祖全 , 李卓球 , 钱觉时 . 碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究 [J]. 建筑材料学报 2004 , 7 (2) 215-

220.

[13] 关新春 , 欧进萍 , 韩宝国 , 等 . 碳纤维机敏混凝土材料的研究与进展 [J]. 哈尔滨建筑大学学报 2002 , 35 (6) : 55-59.

[14] WEN Si-hai , CHUNG D D L. Seebeck effect in carbon fiber-reinforced cemen [J]. Cement and Concrete Research , 1999 , 29 (10) : 1989-1993.

[15] 司琼 , 董发勤 . 电磁屏蔽混凝土的发展现状 [J]. 混凝土 2005 (2) 8-11.

[16] 沈文忠 , 张雄 . 碳纤维及碳纤维功能混凝土 [J]. 上海建材 2004 (2) : 16-18.

[17] FU Xu-li , CHUNG D D L. Submicron carbon filament cement-matrix composites for electromagnetic interference shielding [J]. Cement and Concrete Research , 1996 , 26 (10) : 1467-1472.

[18] 张卫东 , 徐学燕 . 碳纤维混凝土的特性及发展前景 [J]. 森林工程 2004 , 32 (1) 61-63.

[19] SHI Z Q , CHUNG D D L. Concrete for magnetic shielding [J]. Cement and Concrete Research , 1995 , 25 (5) 939-944.

[20] FU Xu-li , LU W , CHUNG D D L. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement [J]. Cement and Concrete Research , 1996 , 26 (1) : 15-20.

[21] REZA F , GORDON B , BATSON , JERRY A. YAMAMURO , et al. Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites [J]. ACI Materials Journal , 1998 (M4) 25-35.

(收稿日期 2005-10-07 编辑 高建群)

(上接第 60 页)

b. 主坝最大断面 2 种工况下 , 斜墙 (老小坝) 坝壳渗透坡降均在允许坡降范围之内 , 但接近于上限。出逸坡降均小于允许坡降 , 斜墙 (老小坝) 与基岩面接触渗透坡降为 1.51 ~ 2.36 , 接近于允许接触渗透坡降的上限 , 有可能产生渗透变形。实际运行过程中 , 1998 年下半年曾出现过渗流量突然增大的异常现象。

另外对主坝小涵管断面也进行了 2 种工况的计算 , 老小坝与涵管上部接触面最大渗透坡降分别为 1.61 和 1.85 , 在允许接触渗透坡降范围之内 ; 混凝土截水墙与老小坝接触渗透最大坡降分别为 3.4 和 3.7 , 超过一般允许的接触渗透坡降 , 因此有可能在此部位发生渗透破坏。混凝土截水墙与基岩接触面渗透坡降分别为 2.77 和 3.02 , 不会发生渗透破坏。

4.3.3 大坝浸润线分析

从计算结果绘出的浸润线可以看出大坝在所计算工况下的坝后浸润线出口并不高。

5 结论及建议

a. 通过实测资料、钻探资料分析及渗流有限元

计算 , 得到如下结论 : 坝体内部坡降在允许范围之内 , 但主坝斜墙 (老小坝) 与基岩接触面渗透坡降接近允许坡降的上限 ; 大坝填土中含有分散性土 , 量水堰观测资料显示曾出现过异常现象 ; 坝体大小涵管渗漏情况尚不明确 , 计算的小涵管截水墙与老小坝体接触面渗透坡降超过一般规定的允许值 , 主坝渗流性态存在不安全因素。

b. 建议对坝底大小涵管封堵段加长 , 以减小渗透坡降 , 排除渗透破坏的可能性 , 建议对大坝上部进行灌浆处理。

c. 建议增设渗压计 , 加强渗流观测 , 以便于与有限元理论计算成果相比较。

参考文献 :

[1] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范 [S].

[2] 闫澍旺 , 王瑞钢 , 王学军 , 等 . 白石水库渗流场有限元 [J]. 水力发电 2003 (2) 53-61.

[3] 毛昶熙 . 渗流计算分析与控制 [M]. 北京 : 水利电力出版社 , 1990.

(收稿日期 2006-04-10 编辑 高建群)