

云龙水库黏土心墙堆石坝渗流问题分析

李 蜀

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 介绍云龙水库坝址区的工程地质及水文地质情况, 针对其复杂的地质条件, 对大坝渗流及渗透稳定问题采用二维和三维渗流有限元计算, 分别对渗透系数敏感度、最大断面渗流、绕坝渗流、防渗效果进行分析, 结果表明, 本文计算分析方法能客观地反映该大坝的渗流情况。

关键词: 大坝渗流; 有限元计算; 土石坝; 云龙水库大坝

中图分类号: TV641.4+1 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2005)S1-0076-03

1 工程概况

云龙水库工程是昆明市掌鸠河引水供水工程的水源工程, 位于金沙江水系二级支流掌鸠河上游峡谷河段内, 水库控制径流面积 745 km², 多年平均产水量 3.08 亿 m³。枢纽工程由大坝、泄洪隧洞、溢洪道、引水隧洞等组成。大坝为黏土心墙堆石坝, 最大坝高 77.00 m, 总库容 4.84 亿 m³。该工程坝区地质构造复杂, 大坝右岸坝基有一条宽 19~23 m 顺河床的 F₂ 断裂带, 两岸卸荷作用强烈, 卸荷裂隙、顺河向陡倾角节理较为发育, 坝址区多层地下水, 渗流状态异常复杂, 采用二维、三维渗流计算方法对大坝进行分析计算是十分必要的。

1.1 工程地质及水文地质情况

坝址位于云龙复式背斜之大阴地宽缓穹隆构造的西北缘—东北缘, 岩层总体走向呈弧形, 走向由 N25°E 至 E 至 S25°E, 自上游到下游渐变, 倾向 NW 至 NE, 倾角 7°~21°。大坝左岸中上部为砂岩、泥岩、页岩互层, 软硬岩石之间泥化夹层发育, 层间错动明显。中下部有燕山期侵入岩脉穿插, 下部、河床及右岸为白云质砂岩。

坝址区普遍存在顺河床向、横河床向两组陡倾角节理, 无充填或充填岩屑、钙膜及方解石脉。两岸卸荷作用强烈, 左岸卸荷带水平宽度为 9.0~21.5 m, 右岸为 10.0~19.2 m。在白云质砂岩中岩溶、溶隙沿顺河向构造节理、卸荷裂隙发育, 延伸长度一般 5~15 m, 发育密度每 100 m² 有 3~15 个。

大坝右岸下部有规模较大、顺河床的 F₂ 断层,

该断层与坝轴线成 79° 交角, 两条由陡倾角的 F₂₋₁ 右旋逆断层、F₂₋₂ 右旋正断层夹断块组成, 在坝基内宽度 19~22 m, 为典型的断陷带。F₂₋₁ 和 F₂₋₂ 破碎带宽 0.2~1.0 m, 由微透水的断层泥、糜棱岩、泥钙质胶结砾岩组成。断块由于两侧断层的挤压作用, 褶曲构造、剪切节理、劈理极为发育, 并且 F₂ 断裂带断块中分布有溶洞, 洞径 500~2 000 mm, 发育密度每 100 m² 有 1~2 个, 因此 F₂ 断裂带为强透水带。

坝址内存在多层地下水, 其相互间的补给、径流、排泄关系较为复杂。总体上, 区内地下水主要接受大气降水补给, 沿各含水透水层中孔隙、裂隙径流, 互为补给, 最终向掌鸠河下游河床排泄。

勘探钻孔压水试验表明, 坝基强、弱风化岩体具有中~强透水性, 透水率 ω 一般大于 10 Lu; 微风化岩体具有弱透水性, 透水率 $\omega \leq 3$ Lu, 可作为大坝防渗的相对不透水层。

坝基心墙截水槽开挖后, 强透水的 Q 松散孔隙含水透水层、全强风化岩体孔隙-裂隙含水透水层已基本清除, 卸荷带透水带、岩溶透水带、断裂带含水透水带等强透水带已清除了一部分, 截水槽基面下仍然存在 K₂m³⁻⁴ 裂隙含水透水层、K₂m³⁻² 裂隙含水透水层、K₂m²⁻¹ 裂隙含水透水层、断裂带含水透水带、卸荷带透水带以及岩溶透水带, 是坝基渗漏的主要通道。左坝端处于卸荷透水带, 地下水位低于水库正常蓄水位, 是渗漏的主要通道。外延是中等~强透水的强风化岩体孔隙-裂隙含水透水层、弱~中等透水 K₂m³⁻⁴ 裂隙含水透水层、K₂m³⁻² 裂隙含水透水层, 地下水水位均低于水库正常蓄水位, 也存在渗

漏。在深部 K_2m^{2-1} 含水透水层中存在一条宽 5 ~ 10m 的岩溶透水带,为强透水,沿 γ_{n5}^3 侵入岩脉接触带外侧展布或沿砂岩与白云岩接触面分布,是渗漏的主要通道之一。右坝端处于卸荷透水带,地下水位低于水库正常蓄水位。外延 13m 与弱微风化、新鲜岩体相对隔水层相交。坝基岩体渗漏情况见图 1。

a. 大坝上游面,考虑水库水位一定情况下的稳定渗流情况,则其满足第一类边界条件,即满足在 X 向边界上的水头已知,法向流速未知。具体的水头值根据水库不同蓄水位进行赋值。

b. 坝基上下游垂直于河床的边界面,以及模型底部边界面都为相对隔水层,因此假定其满足第二类边界条件,即渗流边界上的法向流速已知,水头未知。

c. 将大坝下游坝坡边界面认为溢出面边界,但由于其溢出点位置随着蓄水位不同而不断变化,因此定为未知。

1.2 大坝防渗设施

大坝为黏土心墙堆石坝,坝体通过心墙和坝下防渗帷幕灌浆防渗。大坝心墙上、下游坡比均为 1:0.25,顶宽 3m,最大低宽 41.0m。心墙下设置 1.0m 厚的钢筋混凝土 C20 垫层,垫层范围底部基岩铺盖固结灌浆,深度为 5m,孔排距一般为 4m,灌浆标准为 $\omega \leq 5 Lu$ 。坝基帷幕灌浆沿心墙轴线(与坝轴线偏离 3m)布置。沿整个大坝心墙基础向两岸山体直线延伸,左坝肩帷幕延伸 52m,右坝肩帷幕延伸 16m,底界深入相对隔水层 5m。防渗帷幕 2 排孔布置,孔距 2m,排距 1.4m。 F_2 断裂带盖板范围底部固结灌浆深度为 10m,孔排距一般为 3m,标准为 $\omega \leq 5 Lu$ 。防渗帷幕 3 排孔布置,排距 1.4m,孔距 2.0m,防渗帷幕灌浆标准为 $\omega \leq 3 Lu$ 。

2 渗流分析计算模型及计算参数

渗流分析采用多孔介质连续渗流理论,将坝区的渗流场按工程地质岩层简化为一个非均质的、服从达西定律的多孔介质渗流进行计算。



图 1 坝基岩体地质及帷幕边界线

2.1 模型的离散

计算采用较为灵活的计算模型,为确保计算的准确性,考虑到 F_2 断裂带左、右两侧 F_{2-1} 与 F_{2-2} 断层破碎带的断层泥、糜棱岩透水性极微,视为隔水层。对顺河向最大断面、 F_2 断裂带采用平面二维渗流有限元计算,最大断面共剖分单元 2165 个,节点 4490 个; F_2 断裂带切割断面共剖分单元 1735 个,节点 3592 个。

对大坝两岸采用三维渗流有限元计算,三维渗流计算共剖分网格单元 352364 个,节点 35690 个。

2.2 边界条件

渗流计算,考虑大坝所处的地形地质以及水文条件,将二维、三维渗流有限元计算边界简化为:①节点水头通过计算迭代求出。②计算中单位透水率 $\omega \leq 3 Lu$ 的岩层作为相对隔水层,作计算模型的下边界。

2.3 计算参数

坝区地层非常复杂,根据坝基大量的钻孔压水试验,得到具有较好的代表各地层计算渗透系数,见表 1。

表 1 计算所用渗透系数 m/d

坝基岩体	渗透系数	坝基岩体	渗透系数
强/弱风化砂岩	43.9/13.5	坝体堆石	44.6
强/弱风化泥岩、页岩	6.82/0.02	心墙	4.93×10^{-3}
弱风化白云砂岩	8.64	反滤层	5.01
浸入岩 γ_{n5}^3	2.58	混凝土盖板	1×10^{-5}
F_2 断裂带	43.88	帷幕	3×10^{-3}
F_{2-1} 和 F_{2-2} 断层破碎带	0.8	固结灌浆	5×10^{-3}

3 计算成果分析

3.1 渗透系数敏感度分析

选取了河床最大断面,正常水位工况,渗透系数减小为原来的 10% 或增大为原来的 10 倍,即:①黏土心墙的渗透系数变化范围选定为 $4.93 \times 10^{-4} \sim 4.93 \times 10^{-2} m/d$;②帷幕的渗透系数变化范围选定为 $3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2} m/d$;③岩层材料渗透系数变

- K_{2j} 粉砂泥岩夹粉细砂岩
- K_{2m}^{3-4} 细~中粒长石石英砂岩夹页岩
- K_{2m}^{2-3} 粉砂质泥岩夹页岩
- K_{2m}^{3-2} 细粒长石石英砂岩,中部夹极薄层状石英粉砂岩与页岩互层
- K_{2m}^{3-1} 粉砂岩、泥岩及页岩互层
- K_{2m}^{2-3} 白云质细粒长石石英砂岩
- K_{2m}^{2-2} 极薄层状含砂质粉、细晶白云岩
- K_{2m}^{2-1} 白云质细粒石英砂岩
- K_{2m}^{1-4} 砂质白云岩含白云质泥质粉砂岩
- K_{2m}^{1-3} 泥质胶结长石石英砂岩
- γ_{n5}^3 白云石化基性粉岩侵入岩脉

化系数选定为 0.1~10 倍,分别对黏土心墙、防渗帷幕以及坝基岩层材料的渗透系数进行敏感度分析。

计算得出:心墙黏土渗透系数减小为原来的 10%,渗漏量减少 88.47%,渗透系数增大 10 倍,渗漏量增加 111.21%。防渗帷幕渗透系数减小为原来的 10%,渗漏量减少 27.57%;渗透系数增大 10 倍,渗漏量增加 386.29%。岩层渗透系数减小为原来的 10%,渗漏量减少 50.78%;渗透系数增大 10 倍,渗漏量增加 169.16%。从这些计算结果看出防渗帷幕的渗透系数对大坝渗漏影响最大,应予高度重视。

3.2 最大断面渗流计算成果分析

坝体最大断面等势线如图 2 所示。在正常蓄水位下,心墙体的防渗效果是非常明显的,心墙下游侧剩余水头在 4.7% 以下,最大坝位防渗黏土心墙与混凝土垫层接触面上渗透坡降达到 18.76,远离接触面的单元渗透坡降最大仅为 5.71。坝体心墙后反滤层最大出渗坡降为 0.44。这说明在反滤层保护下心墙渗透稳定满足安全性运行要求。大坝基础经混凝土垫层下铺盖固结灌浆后,最大渗透坡降在固结灌浆与防渗帷幕灌浆接头处为 17.24,防渗帷幕最小渗透坡降为 1.54,均小于防渗帷幕幕体允许渗透坡降不大于 25 的要求。

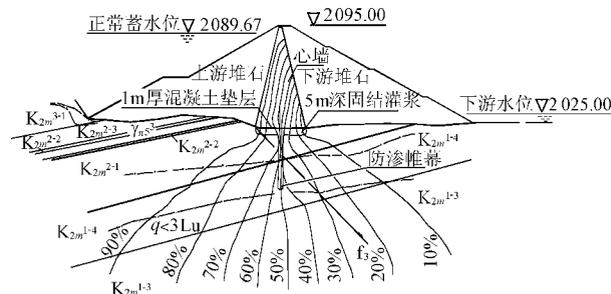


图 2 最大断面等势线

3.3 F₂ 断裂带渗流计算成果分析

计算成果表明,大坝右岸 F₂ 断裂带剖面采用二维、三维渗流计算,结果基本一致,这是由于 F₂ 断裂带左、右两侧 F₂₋₁ 与 F₂₋₂ 断层破碎带的断层泥、糜棱岩透水性极微所致。F₂ 断裂带坝下基础的平均透水率 $\omega = 192.67 \text{ Lu}$, 透水率大值均值 $\omega = 699.83 \text{ Lu}$ 。经固结灌浆和帷幕灌浆截断了坝下强风化岩体的渗漏通道,对降低下游浸润面有较大作用,防渗效果明显。单宽渗流量为 $2.79 \text{ m}^3/\text{d}$ 。从图 3 看出,防渗帷幕最大水力坡降为 13.78,最小水力坡降为 1.71,均小于允许水力坡降 25;断裂带混凝土塞范围经防渗帷幕及固结灌浆削减水力梯度,水力坡降为 0.13,坝下游堆石区基础水力坡降为 0.10,均小于 F₂ 断裂带的允许水力坡降 ($J_c = 0.2 \sim 0.4$),渗透变形问题得到有效控制。

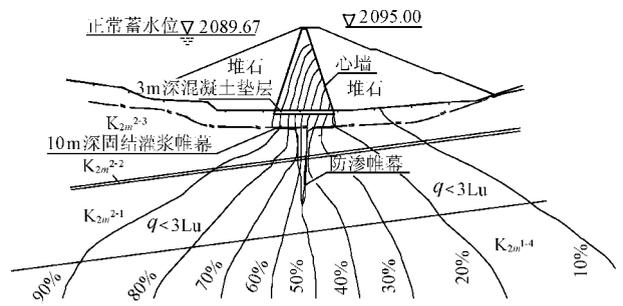


图 3 F₂ 断裂带大坝断面等势线

3.4 绕坝渗流分析

大坝左岸山体地下水位均较低,与相对隔水层界线或正常蓄水位相交位置距离坝肩较远,如按规范要求的帷幕延伸至水库正常蓄水位与蓄水前地下水位相交或水库正常蓄水位与相对隔水层界线相交,其帷幕工程量较大。根据地质勘探资料分析,防渗帷幕灌浆延伸至左坝端 52.0 m,能封堵岸坡未挖除的卸荷透水带的主要渗漏通道,对 52.0 m 以外的岩体为中~弱透水带,深部在白云质砂岩含水透水层中的一条宽约 5.0~10 m、长约 80 m 的岩溶强透水带,经分析计算,年渗漏量较小,为 $40.25 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中深部透水层年渗漏量为 $13.35 \times 10^4 \text{ m}^3$,将不影响水库蓄水。三维渗流等势线图(图 4)表明,坝区左岸以绕坝向掌坞河下游河谷渗流为主,渗透等势线从上游到下游逐渐降低,在坝轴线帷幕灌浆处等势线密集,其后就变得较为平缓,在接近下游河谷处浸润线很低,几乎接近下游水位,最大水力坡降小于边坡允许水力坡降,说明左坝端经 52.0 m 范围防渗帷幕灌浆处理后满足工程安全运行。

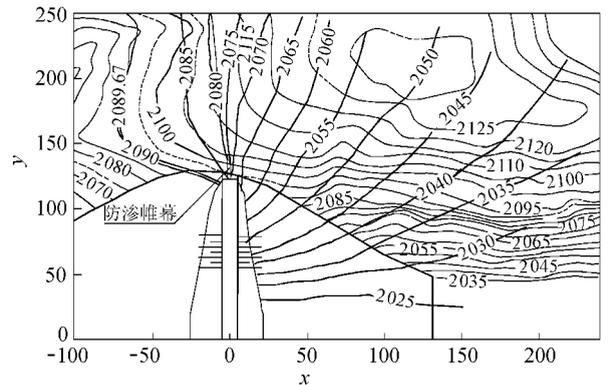


图 4 大坝左岸渗流等势线

3.5 防渗效果

大坝坝基渗漏及绕坝渗漏问题工程地质专题勘察报告揭示,未进行帷幕灌浆前的总渗漏量为 $13.7991 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。大坝基础防渗处理后,二维渗流计算得出大坝单宽渗流量 $3.15 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,其中坝基单宽渗漏量约为 $2.63 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,约占整个单宽渗漏量的 83.5%;三维渗流计算得出大坝(下转第 86 页)

的情况下,采用泵送方式,混凝土需较多地增加水泥用量,而水泥用量越多,混凝土凝固时产生的水化热就越多,不利于防止混凝土裂缝的产生。为此,施工中混凝土拌和物采用了机动翻斗车运输。

底板混凝土浇筑过程中,按规定坯厚均匀浇筑,认真平仓,以保证混凝土密实、均匀。浇筑完成后,采用轻型真空吸水设备,对表面混凝土进行真空吸水处理,以吸出混凝土中的游离水和气泡,达到降低水灰比、提高混凝土早期强度的目的。

底板浇筑完成后,突遭寒流袭击(夜间最低气温降至 -12°C),为防止新浇混凝土受冻而造成强度损失,立即在仓面搭设暖棚,棚内生火炉,并加设碘钨灯,使仓内温度保持在 5°C 左右。混凝土表面采用两布一膜土工布覆盖,并在其上部及模板四周再加覆2层草帘,对底板混凝土进行保温、保湿养护。

4 结 语

小塔山水库溢洪闸底板,其底部为基岩,对底板

(上接第78页)总渗漏量为 $1421.79\text{ m}^3/\text{d}$,其中坝体、坝基、绕坝渗漏量分别为 $20.13\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $281.70\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $1119.96\text{ m}^3/\text{d}$,分别占渗流总量的 1.42% 、 19.91% 和 78.77% 。由此看出,经帷幕灌浆后渗透量减少 99% 。

4 结 语

通过对云龙水库大坝选取二维、三维渗流计算得知:

a. 黏土防渗心墙与垫层接触局部地区渗透坡降仍较大,应做好反滤层设计。

b. 主要渗漏来自于坝基渗漏和绕坝渗流,心墙渗漏较小,因此帷幕灌浆防渗处理在整个工程中至关重要,防渗帷幕的质量优劣对坝基渗流控制起决定性的作用,在施工阶段一定要严抓施工质量,保证工程安全运行。

c. 大坝心墙混凝土垫层下设置铺盖固结灌浆层,可将原在混凝土垫层与基岩接触面上产生的最大水力坡降移到固结灌浆层底部,增加岩体盖重,解决混凝土垫层较薄、与基础接触面上作用水头压力较大而灌浆压力不宜过大、难以灌好的缺陷。此外,固结灌浆与混凝土垫层一起可将基岩与土质防渗体分开,防止接触冲刷。

d. 大坝左岸坝肩防渗帷幕延伸 52 m ,虽然未能到达正常蓄水位与相对隔水层界线或地下水位交

的约束作用较强,再加上在冬季气温较低条件下施工,极易产生裂缝。但在实施过程中,经各参建单位的共同努力,采取多种行之有效的预防措施,最终取得了良好的效果。从施工结束到现在2年多时间,经省水利工程检测站初步检测,未发现裂缝。这说明,只要结合建筑物特点,认真仔细地分析裂缝产生的原因,有针对性地采取措施,可以尽量避免裂缝的产生,或将其控制在允许范围之内,从而大大提高水利建筑物的安全性、耐久性,对水利工程综合效益的充分发挥具有重要意义。

参考文献:

- [1] 华东水利学院,大连工学院,陕西机械学院,等.水工钢筋混凝土结构学[M].北京:水利电力出版社,1983:144.
- [2] 赣榆县水利史志编纂委员会.赣榆县水利志[M].北京:方志出版社,2000:72.
- [3] SL/T191-96 水工混凝土结构设计规范[S].

(收稿日期 2005-07-06 编辑 高建群)

点,但经三维渗流分析,防渗帷幕以外范围的渗流量较小,大坝下游岸坡山体不存在渗透变形问题,防渗及渗透坡降满足要求。

e. 大坝、坝基及绕坝渗流的渗流量不大,大坝整体年渗漏量为 $5.18 \times 10^5\text{ m}^3$,不到掌鸠河多年平均产水量的 0.2% ,占水库总库容的 0.107% 。

云龙水库坝址区地质条件复杂,对大坝的渗流与渗透稳定关键性技术问题采用二维、三维渗流计算,能客观地反映坝址区渗流的情况。工程施工过程中,聘请第三方进行质量检查,确保了灌浆施工质量。云龙水库于2004年3月1日下闸蓄水,从大坝安全监测仪器资料显示,水库各项技术指标均在设计控制范围内,说明大坝基础防渗设计较切合实际。

参考文献:

- [1] 张树洪.昆明市掌鸠河引水供水工程水源工程(云龙水库)设计·大坝坝基渗漏及绕坝渗漏问题工程地质专题勘察报告[R].云南省水利水电勘测设计研究院,2001.
- [2] 龚玉峰,周钊兵.昆明市掌鸠河云龙水库三维渗流计算分析[R].武汉大学,2004.
- [3] 苏卫强.昆明市掌鸠河引水供水工程水源工程(云龙水库)灌浆设计专题报告[R].云南省水利水电勘测设计研究院,2001.

(收稿日期 2005-02-04 编辑 高建群)