

# 中低型混凝土重力坝抗滑稳定计算探讨

张小川 胡艳卉 殷一敏

(重庆市涪陵区水务局, 重庆 涪陵 408000)

**【摘要】** 本文以重庆市涪陵区土地沟水库大坝设计为例,充分考虑坝址工程地质条件、大坝建基面倾角、帷幕防渗以及不常见的坝体盲沟排水、坝后抗力体等因素对坝基抗滑稳定的影响,合理确定计算参数和计算方法,运用不同方法对大坝抗滑稳定计算进行分析。

**【关键词】** 重力坝; 抗滑稳定; 计算

中图分类号: TV222.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)08-0030-04

## Discussion on anti-slip stability calculation in medium and low concrete gravity dam

ZHANG Xiaochuan, HU Yanhui, Yin Yimin

(Chongqing Fuling Water Bureau, Fuling 408000, China)

**Abstract:** In the paper, design of Chongqing Fuling District Tudigou Reservoir Dam is adopted as an example. The influence of dam site engineering geological conditions, dam foundation surface inclination, curtain anti-seepage and uncommon dam blind ditch, resistance block behind the dam and other factors on the dam foundation anti-slip stability is fully considered. Calculation parameters and calculation methods are determined rationally. Different methods are applied for analyzing dam anti-slip stability calculation.

**Keywords:** gravity dam; anti-slip stability; calculation

### 1 工程概况

#### 1.1 基本情况

土地沟水库工程位于重庆市涪陵区罗云乡,水库大坝按20年一遇洪水标准设计,200年一遇洪水标准校核,坝型为混凝土重力坝,坝顶高程673.30m,校核水位672.84m,设计水位672.59m,正常蓄水位672.00m,总库容39.63万 $m^3$ ,是一座以场镇供水为主,兼有农村人畜供水、防洪等综合效益的小(2)型水库。

#### 1.2 工程设计

大坝挡水坝段设计总长86.60m,顶宽5.00m。坝

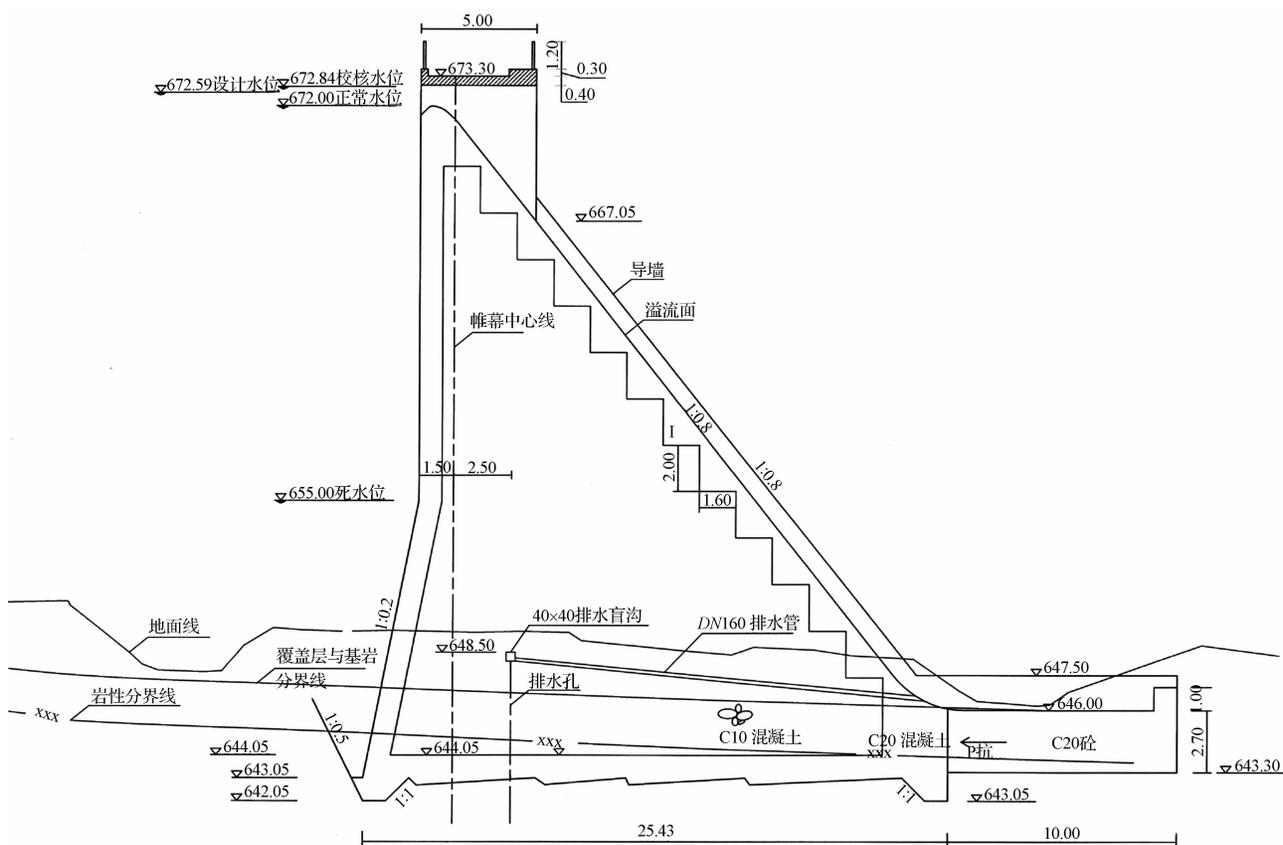
顶高程673.30m,建基面设计高程644.50m,最大坝高28.80m,最大底宽25.14m。上游面高程655.00m以上为铅直面,建基面至高程655.00m坡比1:0.2;下游面668.05m高程以上为铅直面,以下坡比1:0.8。坝体材料,上游面1.0m厚部位和坝基1.0m厚部位采用C<sub>28</sub>W<sub>4</sub>混凝土,坝体内部采用C10混凝土。下游消能设施按20年一遇洪水标准设计,泄洪消能采用底流消能方式,消力池长10.00m,边墙顶高程647.50m,顶宽1.00m,底板顶部高程646.00m,底板厚0.50m,采用C20钢筋混凝土结构。消力池底部设置垂直排水孔,排水孔孔径 $\varphi 50$ ,纵横间距2m,呈梅花形布置。

固结灌浆布置在溢流坝段纵向长25m、上游近坝

踵、下游近坝趾的河床基础范围内,固结灌浆孔距 3m,排距 4m,孔深 6m,帷幕上游区一排固结灌浆孔加深为 8m,平面上呈梅花形布孔。帷幕灌浆采用单排设置,布置在坝轴线上游 1m 处,孔距 2m,河床及左右坝肩中下部深度按坝基往下 25m 控制,上部岸坡段深度按 15m 控制,两岸帷幕线伸入岸坡内的长度延伸至正常蓄水位与相对隔水层相交处。40cm × 40cm 纵向排水盲沟代替帷幕灌浆兼作坝体内排水廊道,排水孔间距

2.5m,孔径 110mm,孔深 15m,在河床坝段内平行于帷幕下游 2.5m 一期灌浆 648.50m 高程坝面上设置,盲沟内用土工布包裹碎石(宽 40cm,高 35cm)充填于沟内,面层用土工膜封闭,其上用水泥砂浆抹平,防止上层混凝土浇筑时水泥砂浆进入盲沟。横向设置两根 DN160PE100 级塑料管,其上游一端埋在纵向盲沟内,下游一端通向溢流坝外。

土地沟水库溢流坝段竣工断面如下图所示。



土地沟水库溢流坝段竣工断面图(图中尺寸高程以 m 计,长度以 cm 计)

### 1.3 工程施工

土地沟水库 2012 年 3 月 1 日开工,2013 年 6 月 8 日完工通过验收并正式蓄水。大坝建基面设计高程 644.50m,实际开挖平均高程 643.05m,平均超挖深度 1.45m,坝基面呈向上游倾斜的反坡状,倾斜角度约为  $5^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 。消力池基础实际高程为 643.30m,超挖超填 2.2m。

## 2 工程地质条件

### 2.1 地形地貌

坝址河床底高程 647.30 ~ 649.40m,枯季河床宽

12.5m,正常蓄水位高程 672.00m 处谷宽 80m,左岸边坡坡度  $37^{\circ}$ ,右岸在 665.00m 高程为一宽 4m 的乡村公路,公路以下坡度  $27^{\circ}$ ,以上  $23^{\circ} \sim 34^{\circ}$ ,不对称的“V”形河谷。

### 2.2 坝址工程地质条件

河床覆盖层厚 2.0 ~ 5.0m。坝基持力层为三叠系须家河组( $T_{3sj}$ )巨厚层状长石石英砂岩。坝址岩层倾向上游略偏左岸,岩层倾角  $43^{\circ}$ ,且坝基不存在连续的软弱夹层,不存在深层抗滑稳定问题。坝基为砂岩,浅表裂隙发育,岩体透水,下部裂隙多闭合,为相对不透

水层。通过钻孔压水试验表明,最大值 56Lu,最小值 6.7Lu,随深度增加,透水率减小。坝基基岩单轴饱和抗压强度 43.8~46.7MPa。

### 2.3 岩石物理力学特性

坝基为砂岩,根据试验结果并结合其他工程类比,其岩石物理力学指标建议值见表 1。

表 1 坝址岩石物理力学参数建议值

项目 层位(岩性)	抗剪断强度		摩擦系数 $f$	承载力/ MPa	密度/ ( $t/m^3$ )	比重
	$f'$	$c'/MPa$				
砂岩	0.85	0.70	0.65	3.0	2.66	2.67

混凝土/砂岩,  $f' = 0.85, c' = 0.65MPa$ 。

## 3 坝基抗滑稳定计算

### 3.1 按抗剪断公式计算

根据《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005)的规定,若坝地质条件较好,采用抗剪断强度公式是合适的。土地沟水库河床坝段基础开挖后,在建基面钻芯取样试验显示基岩单轴饱和抗压强度达 43.8~46.7MPa,应属Ⅲ类岩体,且不存在连续的软夹层分布和深层抗滑稳定问题,因此,可直接按照抗剪断公式进行计算。

选取溢流坝段 643.05m 高程(超挖后建基面平均高程)为底的横断面作为复核计算断面。

计算公式:

$$K' = \frac{f' \sum W + C'A}{\sum P}$$

参数  $f'$  取 0.8,  $C'$  取 0.6MPa, 小于规范规定的下限值和地勘报告的推荐值。坝基扬压力折减系数  $a$  河床坝段取 0.25、岸坡坝段取 0.50, 混凝土密度取  $2.4t/m^3$ , 钢筋混凝土密度取  $2.5t/m^3$ 。设计及校核工况条件下计算结果见表 2。

### 3.2 按抗剪公式计算

计算断面选取同上。计算公式:

$$K = \frac{f \sum W}{\sum P}$$

参数  $f$  取 0.6(规范建议值 0.55~0.65, 地勘报告建议值 0.65)。坝基扬压力折减系数  $a$ 、混凝土密度、

钢筋混凝土密度取值同上。河床坝段基础建基面设计呈向上游倾斜的反坡状(锯齿状),建基面实际开挖呈向上游倾斜约为  $5^\circ \sim 15^\circ$ ,取坝基向上游存在  $5^\circ$  的倾角计算。设计及校核工况条件下计算结果见表 2。

表 2 大坝抗滑稳定计算成果

荷载组合	运用工况	计算结果			规范值
		抗剪断安全系数 $K'$	抗剪安全系数 $K$	考虑抗力体 $K$	
基本组合	设计洪水位 672.59m	4.63	1.13	—	$K'$ 不小于 3.0, $K$ 不小于 1.05
特殊组合	校核洪水位 672.84m	4.56	1.11	2.94	$K'$ 不小于 2.5, $K$ 不小于 1.00

### 3.3 考虑下游抗力体

潘家铮在《建筑物的抗滑稳定和滑坡分析》一书中,对坝趾有抗力体的重力坝安全稳定计算进行了阐述,本文参照书中所述原理进行分析计算。

土地沟水库重力坝设计在坝踵、坝趾设有齿槽,大坝建基面亦开挖成向下游抬高的锯齿状倾斜面,坝下游厚度 2.7m 的混凝土消力池底板(未计入消力池底板以下高出大坝建基面 0.25m 的岩槛高度)作为抗力体,此处抗力体除了与坝趾紧密连接的一面之外,其余三面皆因消力池基坑超挖超填而致底板深嵌于围岩之中,且建基面遍布锚杆,加强了底板混凝土与基岩的连接。因此,土地沟水库大坝属于坝趾有抗力体的重力坝,当大坝存在向下游滑动的趋势时,与消力池混凝土相互作用产生的水平抗力  $P_{抗}$  也应计算在内,抗力  $P_{抗}$  可视为有利于坝体稳定的被动力。

《建筑物的抗滑稳定和滑坡分析》一书中论述到:“抗力体新鲜完整,无上述不良裂隙存在,在此情况下,抗力值  $P_{抗}$  是比较大的,其极限值最好通过一定规模的试验确定。当然,  $P_{抗}$  值不能大于基岩的抗压强度和抗力体的乘积”。土地沟水库坝趾抗力体,即消力池底板的混凝土标号设计强度已经设定,施工浇筑已达到强度要求,并且在与大坝基础以上部位混凝土的相互作用中,设计取强度较小值参与复核。该工程消力池底板混凝土能够提供的抗力体  $P_{抗}$  值不能大于消力池混

凝土(或坝体混凝土,取两者抗压强度低者)抗压强度和消力池混凝土厚度的乘积。

土地沟水库大坝混凝土采用“金包银”结构,其中坝体内部采用 C10 混凝土,外包混凝土为 C20,消力池采用的是 C20 钢筋混凝土,取抗压强度最低的内部 C10 混凝土作为计算依据。大坝内部采用 C10(养护期 28d)常态混凝土,根据《混凝土结构设计规范》(SL 191—2008),90d 龄期混凝土抗压强度可取 28d 龄期抗压强度的 1.2 倍,则坝体 C10 混凝土 90d 龄期的极限强度可取为 12MPa,根据《重力坝设计规范》(SL 319—2005)6.3.10 规定,混凝土的允许应力应按混凝土的极限强度除以相应的安全系数确定。坝体混凝土抗压安全系数,基本组合应不小于 4.0;特殊组合(不含地震情况)应不小于 3.5。则在校核水位工况下,混凝土的允许应力取为  $12/3.5 = 3.43\text{MPa}$ ,则消力池作为抗体,可提供的被动抗力  $P_{\text{抗}}$  的取值范围为  $0 \leq P_{\text{抗}} \leq 9261\text{kN}$ 。

考虑抗力体这个因素后,安全系数计算公式相应改变为

$$K = \frac{f\sum W + P_{\text{抗}}}{\sum P}$$

或者

$$K = \frac{f\sum W}{\sum P - P_{\text{抗}}}$$

将抗力  $P_{\text{抗}}$  放在分子或分母上,表示的意义不同,因为公式中的分母表示推动坝体滑动的力,带有主动性;分子则表示抗滑力,带有被动性质,因此,将  $P_{\text{抗}}$  值放入分子比较合理。

抗力  $P_{\text{抗}}$  的取值范围为  $0 \leq P_{\text{抗}} \leq 9261\text{kN}$ ,按照  $K = \frac{f\sum W + P_{\text{抗}}}{\sum P}$  计算, $f$  取 0.6,其他参数取值同上。校核工况下坝基抗滑稳定安全系数计算结果见表 2。

## 4 讨 论

a. 土地沟水库坝体安全稳定设计计算借鉴了重庆市丰都龙河石板水电站大坝(坝高 84.1m、总库容 1.055 亿  $\text{m}^3$ )的设计经验。该坝坝区分布侏罗系中统上沙溪庙组的地层,分布在坝区谷坡下段及河床中部

厚度 15~17m 的厚层块状砂岩,是大坝主体工程的主要持力层。左岸坝段长 190m,建基面为砂质泥岩,最大坝高 55.6m;右岸坝段长约 60m,建基面亦为砂质泥岩,大坝抗滑稳定计算只按抗剪断强度公式计算,没有用抗剪强度公式复核。另外对砂岩、泥岩基础的非溢流挡水坝段,均采用了坝趾抗力体的构造。至今已安全蓄水运行近 20 年。大坝由国家电力公司成都勘测设计研究院设计,对建在较软弱砂质泥岩基础上的较高重力坝段做了成功的实践。

土地沟水库大坝基础属巨厚层状砂岩,建坝地质条件优于石板水电站大坝,按照规范所提要求,采用抗剪断强度公式是合适的。参数  $f'$ 、 $C'$  取值小于规范规定的下限值和地勘报告的推荐值,计算结果得出抗剪断安全系数  $K'$  值在设计、校核工况下各为 4.63、4.56,分别大于规范 3.2.5 的最低要求值。

b. 土地沟水库坝体抗滑稳定如果按照抗剪强度公式进行计算,并且将河床大坝建基面视为水平面,就会得出“安全度处于临界状态,几乎没有余度”“大坝稳定基本满足要求”的结论。然而实际情形是大坝基础施工时已按设计要求开挖成向上游倾斜的锯齿状,倾斜约为  $5^\circ \sim 15^\circ$ (有基础验收记录和照片为据)。取坝基向上游存在  $5^\circ$  的倾角计算,得出抗剪安全系数  $K$  值在设计、校核工况下各为 1.13、1.11,分别大于规范 1.05、1.00 的最低要求值。

c. 土地沟水库大坝及消力池基础开挖存在超挖超填,致消力池底板混凝土厚度增至 2.7m,事实上构成了大坝坝趾的抗力体。按潘家铮提出的抗力体的概念和计算公式,计算得出校核工况下抗滑稳定安全系数  $K$  值为 2.94,亦大于规范规定的最低要求值 1.0。

d. 土地沟水库建成运行至今已历 3 个汛期,期间下了一场接近 20 年一遇的暴雨,初步经受了接近发生 20 年一遇的洪水的考验。200 年一遇的校核洪水位只高出 20 年一遇的设计洪水位 0.25m,已是微不足道。

综上所述,土地沟水库大坝抗滑稳定用了三种方法进行计算,互为校核,均得出了安全系数大于规范规定最小值的结果。说明土地沟水库大坝抗滑稳定是安全的,并且经历了三年蓄水、

(下转第 41 页)

- 34(2):332-339.
- [4] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concrete; A green structural material with enhanced energy dissipation capability[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42(5):196-204.
- [5] ATAHAN A O, YUCEL A O. Crumb rubber in concrete; Static and dynamic evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36(12):617-622.
- [6] 王可良, 隋同波, 许尚杰, 等. 岩基约束橡胶集料混凝土开裂应变试验[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4):182-186.
- [7] ZHENG L, HUO X S, Yuan Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5):939-947.
- [8] 王可良, 吕兴友, 刘延江, 等. 橡胶集料混凝土的极限拉伸变形试验[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6):103-105.
- [9] YOUSSEF O, ELGAWADY M A, MILLS J E, et al. An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53(2):522-532.
- [10] 周洪涛, 彭刚, 胡海周, 等. 循环荷载作用下混凝土塑性变形试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(3):41-44.
- [11] NADAL GISBERT A, GADEA BORRELL J M, PARRES GARCIA F. Analysis behavior of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(1):671-682.
- [12] SADR MONTAZI A, ZARSHIN ZANOOSH R. The effects of polypropylene fibers and rubber particles on mechanical properties of cement composite containing rice husk ash[J]. Procedia Engineering, 2011(10):3608-3615.
- [13] SHU Xiang, GRAHAM R K, HUANG Baoshan, et al. Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar[J]. Materials and Design, 2015, 65(1):1222-1228.
- [14] ALI M, LIU A, HOU, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30(5):814-825.
- [15] HOSSAIN K M A, LACHEMI M, SAMMOUR M, et al. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres[J]. Construction and Building Materials, 2013, 45(8):20-29.
- [16] IVORRA S, GARCES P, CATALA G. Effect of silica fume particle size on mechanical properties of short carbon fiber reinforced concrete[J]. Materials and Design, 2010, 31(3):1553-1558.
- [17] 刘锋, 张文杰, 何东明, 等. 橡胶粉-纤维改性高强混凝土的高温性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2):124-131.
- [18] 王占飞, 杨阳, 王强, 等. 部分填充圆形钢管混凝土桥墩子结构拟动力试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(3):437-442.
- [19] 丁春林, 张国防, 张骅. 新型棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪性能试验与比较[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6):802-806.
- [20] 王可良, 刘玲, 隋同波, 等. 坝体岩基-橡胶粉改性混凝土现场抗剪(断)试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):753-756.

(上接第33页)泄洪的初步检验,在计算分析中,对大坝基础开挖成向上游倾斜的锯齿状,对软弱坝基在坝踵或坝趾部位开挖成较深、较宽的齿槽,以形成抗力体,增进了有利于大坝抗滑稳定的认识。按照规范的条文说明,设计时应根据工程地质条件选取适当的计算公式。一切从实际出发,不是每一座坝,几种计算方法都要用上。同时,本文介绍了坝体内设简易盲沟替代廊道排水的尝试。通过土地沟水库运行至今对盲沟排水管出流的观察,两根汇流管排水至坝下消力池,小

股水流流量稳定,达到了排除坝下渗水、降低扬压力的目的。对于坝体而言,为了降低工程造价和节省长期的抽排廊道集水的费用,可以取消帷幕灌浆兼作排水廊道,而代之以盲沟排水。特别对于低矮不便于布置廊道的重力坝,更可设置盲沟排水。◆

#### 参考文献

- 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,1980.