

# 纸厂水库大坝应力变形模拟计算与安全监测设计分析

赵 静

(新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司云南分院,云南 昆明 650000)

**【摘 要】** 在设计比选阶段,对土石坝进行应力变形模拟分析十分必要。本文采用流固耦合模式模拟计算纸厂水库大坝应力变形,得出了计算结果。依据此结果,并结合规范要求,设计方案中布置了量水堰、测压管、变形点等安全监测设施,同时对黏土心墙施工质量控制也提出了建议。研究方法可供类似工程借鉴。

**【关键词】** 模拟;应力变形;安全监测;设计

中图分类号: TV149.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2018)07-044-05

## Analog Computation and safty monitoring design analysis of paper factory reservoir dam stress deformation

ZHAO Jing

(Xinjiang Corps Survey and Design Institute (Group) Yunnan Branch, Yunnan 650000, China)

**Abstract:** It is very necessary to simulate and analyze the stress deformation of earth-rock dams in the stage of design comparison. Fluid-solid coupling model is adopted to simulate and calculate the stress deformation of paper factory reservoir dam in the paper, and calculation results are obtained. Measuring weir, piezometric tube, deformation point and other safety monitoring facilities are arranged in the design plan according to the calculation results and specification requirements. Suggestion is also proposed for clay core wall construction quality control. The research method can be used as reference in similar projects.

**Key words:** simulation; stress deformation; safety monitoring; design

### 1 引 言

土石坝可充分利用当地材料,节约投资,且地基适应能力强。黏土心墙堆石坝是土石坝中较为常见的一种,若出现黏土心墙与堆石料之间产生过大的沉降差,心墙填筑质量较差,局部不密实等情况,则可能导致心墙产生裂缝,进而引起集中渗漏,影响大坝安全运行,乃至溃坝。实践证明:土石坝的沉降主要受应力状态和时间的影

分量(时间分量)两者之间有耦合影响<sup>[1]</sup>。因此,在设计比选阶段,采用合适的计算模型对土石坝应力变形进行模拟分析是十分必要的,有助于初步了解其变化情况,并有针对性地布设监测设施,为施工、运行及设计提供有价值的监测资料。

纸厂水库位于云南省永德县,大坝设计为黏土心墙堆石坝,本文对坝体应力变形的流固耦合模式模拟计算及相应渗流和变形安全监测设计进行分析与评价,以期类似工程设计提供启示。

## 2 大坝设计简介

### 2.1 工程地质及地震动参数

纸厂水库大坝坝址左、右岸残坡积覆盖层  $Q^{el}$  为含碎块石砾砂粉质黏土、碎石黏土,厚 2.5~4.0m,中等透水。河床部位洪冲积覆盖层  $Q^{ml}$  为卵砾石砂土,卵砾石含量占 40~50%,偶夹灰岩,结构松散,厚 0.5~2.5m,中等透水。覆盖层下伏基岩为石炭系下统平掌组下段( $C_1P^1$ )安山玄武岩、深灰色片理化蚀变安山玄武岩。以河谷为界,两岸岩体结构不同,左岸为黄褐色安山玄武岩,可见原生节理面,透水性较好,风化作用强烈,全风化层厚 8~10m,强风化底界埋深大于 40m。右岸因与灰岩地层接触带相邻,产生接触变质作用,片

理化现象突出,透水性弱,风化作用较左岸弱,全风化层厚 7~9m,强风化底界埋深 20~22m。工程区土料、石料丰富,选定黏土料场和堆石料场运距均不超过 0.7km。

工程区地震基本烈度为Ⅷ度,工程按Ⅷ度设防。

### 2.2 坝体设计

经技术经济比选,大坝设计为黏土心墙堆石坝,坝顶高程 2275.30m,最大坝高 47.9m。黏土心墙顶高程 2274.80m,顶宽 3m,最大底宽 26.2m,上、下游坡比 1:0.25。心墙与堆石料之间设反滤、过渡层,水平厚均为 1.5m。大坝上游坝坡为一级坡,坡比 1:1.75;下游坝坡为二级坡,在变坡处设 2.0m 宽戗台,坡比 1:1.7。大坝典型设计剖面如图 1、图 2 所示。

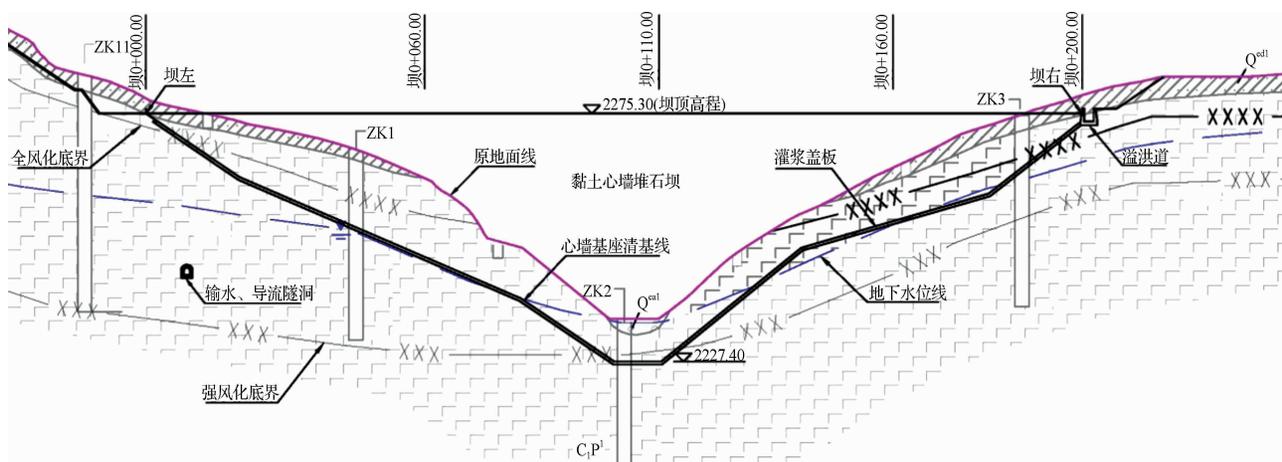


图 1 大坝坝轴线剖面布置

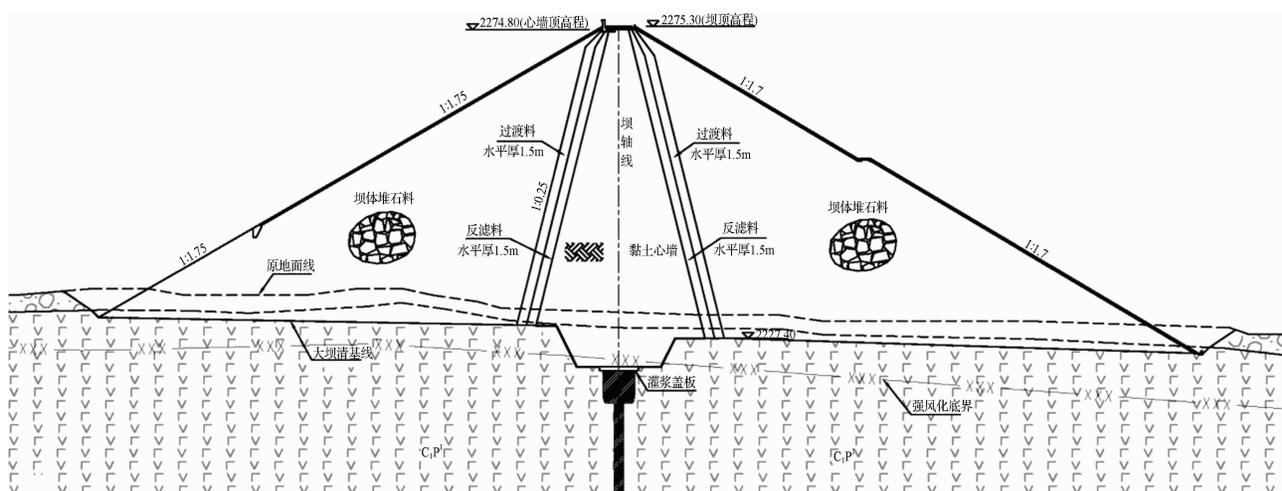


图 2 大坝典型横剖面

### 3 大坝应力变形模拟计算

#### 3.1 流固耦合计算模式简介

FLAC<sup>3D</sup>利用显示差分方法来求解运动方程以及动力方程,能够进行土质、岩石和其他材料的三维结构受力特性模拟和塑性流动分析。通过调整三维网格中的多面体单元来拟合实际结构,并采用显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术,准确地模拟材料的塑性破坏和流动<sup>[2]</sup>。由于无须形成刚度矩阵,因此,基于较小内存空间就能求解大范围的三维问题。计算流程包括构建模型、模拟求解和输出计算结果。

其中,为描述流体和固体的耦合特性,FLAC<sup>3D</sup>渗流模型可与固体模型并行计算。固结是一种流固耦合现象,在固结过程中,孔隙随压力消散而导致固体位移。此行为包含两种力学效应:①孔隙水压力的改变导致有效应力改变,进而影响固体的力学性能,例如有效应力的降低可能引发塑性屈服;②土体中的流体对孔隙体积的变化产生反作用,表现为孔隙水压力的变化。

表1 大坝渗透系数及各区的物理力学指标

部 位	渗透系数/ (cm/s)	天然容重/ (kN/m <sup>3</sup> )	饱和容重/ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙率/ %	凝聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
堆石料( I 区)	$8.5 \times 10^{-1}$	20.0	23.0	25.1%	0	42.5
坝基强风化岩层( II 区)	$1 \times 10^{-3}$	20.0	22.0	40%	50	30
黏土心墙( III 区)	$3.92 \times 10^{-6}$	13.9	24.5	43%	26.5	28.5
反滤料( IV 区)	$5 \times 10^{-3}$	19.8	20.5	41%	0	30

表2 弹性模型参数

部 位	弹性模量	泊松比	体积模量	剪切模量
黏土心墙	$3.98 \times 10^7$	0.21	$2.29 \times 10^7$	$1.64 \times 10^7$
堆石料	$1.47 \times 10^8$	0.14	$6.80 \times 10^7$	$6.45 \times 10^7$
反滤料	$1.34 \times 10^8$	0.13	$6.04 \times 10^7$	$5.93 \times 10^7$
强风化坝基	$2.00 \times 10^9$	0.35	$2.22 \times 10^9$	$7.41 \times 10^8$

#### 3.4 计算方案

计算方案考虑两种工况:

a. 蓄水前的初始应力和沉降变形状态及孔压场,

计算云图如图4~7所示。

#### 3.2 模型构建

纸厂水库大坝底宽172m,最大坝高47.9m。计算网格模型包含10个类别,将大坝分为堆石料区(bianpozuo、bianpoyou、badi1、badi2)、坝基强风化区(tubadi)、黏土心墙区(baxin、badi3)、反滤料区(lvcengzuo、lvcengyou),以及防渗帷幕灌浆区(zhuang)等5个区,如图3所示。计算模型与设计尺寸基本一致。

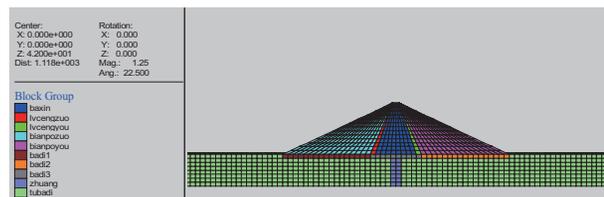


图3 计算模型

#### 3.3 参数选取

计算模型中渗透系数及材料的物理力学指标采用地质建议值,见表1;弹性模量、体积模量等参数由类似工程换算得到<sup>[3]</sup>,见表2。

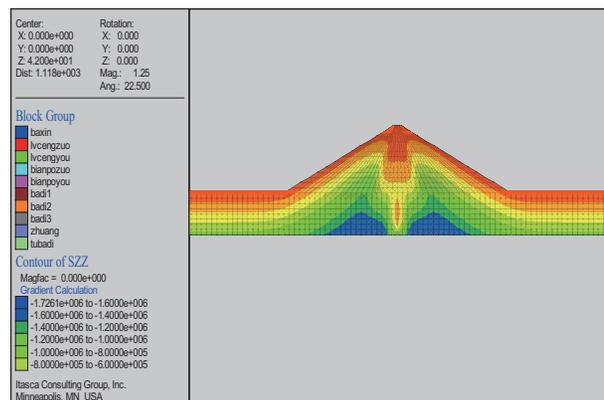


图4 初始应力计算的竖向应力云图

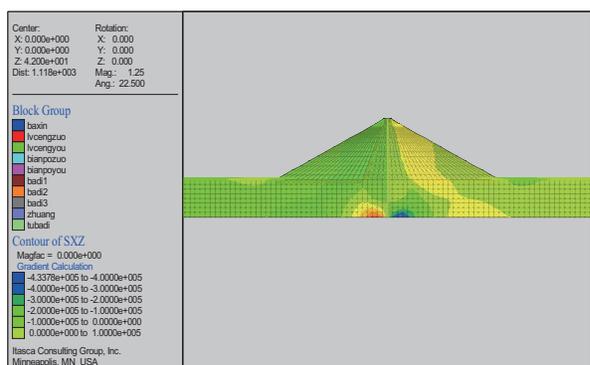


图5 初始应力计算的剪切应力云图

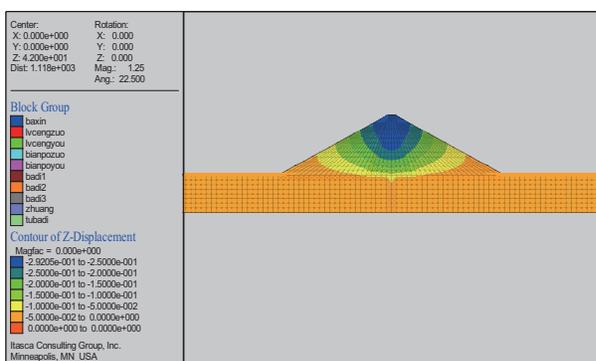


图6 初始应力计算的沉降量云图

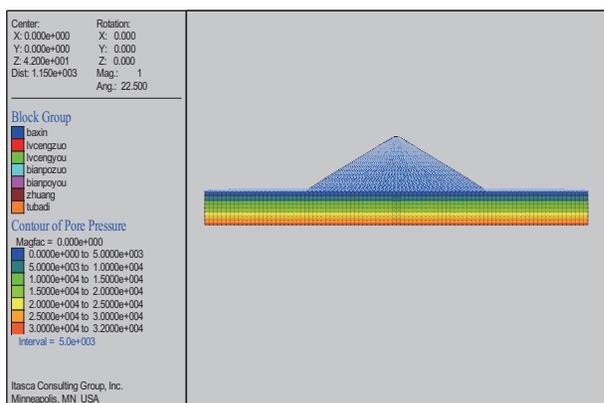


图7 初始应力计算的孔压云图

从图4~5可知,坝体底部心墙轴线两侧的竖向应力和剪应力最大。从图6可知,黏土心墙形心区域(0,0,60)和堆石料形心区域(-40,0,60)分别沉降276mm、114mm,平均沉降差为162mm。图7中帷幕灌浆区域亦考虑了孔隙水压力。

**b. 蓄水后水压力对模型应力的影响。**此时流体模式处于关闭状态,因此模型中的孔压场不随面荷载

的影响而改变。计算结果显示:最大剪应力略有增加,但最大应力区域位置不变;最大水平位移16mm,沉降主要发生在黏土心墙区,黏土心墙形心区域(0,0,60)沉降79mm,堆石料形心区域(-40,0,60)沉降23mm,平均沉降差为56mm。

### 3.5 成果小结

计算结果表明,坝体底部为高应力区,沉降主要发生在黏土心墙区,大坝在蓄水运行期,水平位移很小,大坝稳定性较强。大坝在自重和水压作用下,黏土心墙形心区域(0,0,60)沉降量为355mm,堆石料形心区域(-40,0,60)沉降量为137mm,平均沉降差为218mm。量值均不大。

## 4 安全监测设计

坝体结构设计时,已按规范在黏土心墙与堆石料之间设置了反滤、过渡层,在不均匀沉降出现时,可协调相邻两侧坝料变形。同时,在黏土心墙出现裂缝时,心墙下游侧的反滤层能确保土颗粒不被大量带出,有利于裂缝自行愈合。但若要及时发现不均匀沉降、裂缝等缺陷,合理布设安全监测设施尤为重要。

研究表明,渗流监测成果直接反映心墙是否产生裂缝,而变形可对裂缝成因及发生过程进行描述<sup>[4]</sup>。而且监测成果还可验证计算及设计的合理性,为工程处理提供必要而科学的数据支持。根据计算结果,结合规范要求,纸厂水库大坝安全监测设计包括渗流和变形,平面布置如图8所示。

**a. 渗流监测。**沿河床最大坝高剖面(坝0+110.00m)、左、右岸1/2坝高剖面(坝0+060.00m、坝0+160.00m),坝轴线下游侧共布设9根测压管,编号UP01~UP09,距坝轴线水平距离17.5~77.5m,以监测坝体坝基渗流压力。同时,在下游坝脚纵向排水沟出口处设1座三角形量水堰,编号WE01,测量坝体坝基渗流量。

**b. 变形监测。**在大坝表面平行坝轴线方向布设4条测线,共10个水平兼垂直位移测点,编号TP01~TP10,其中坝顶轴线上、下游侧各1条,距坝轴线均为

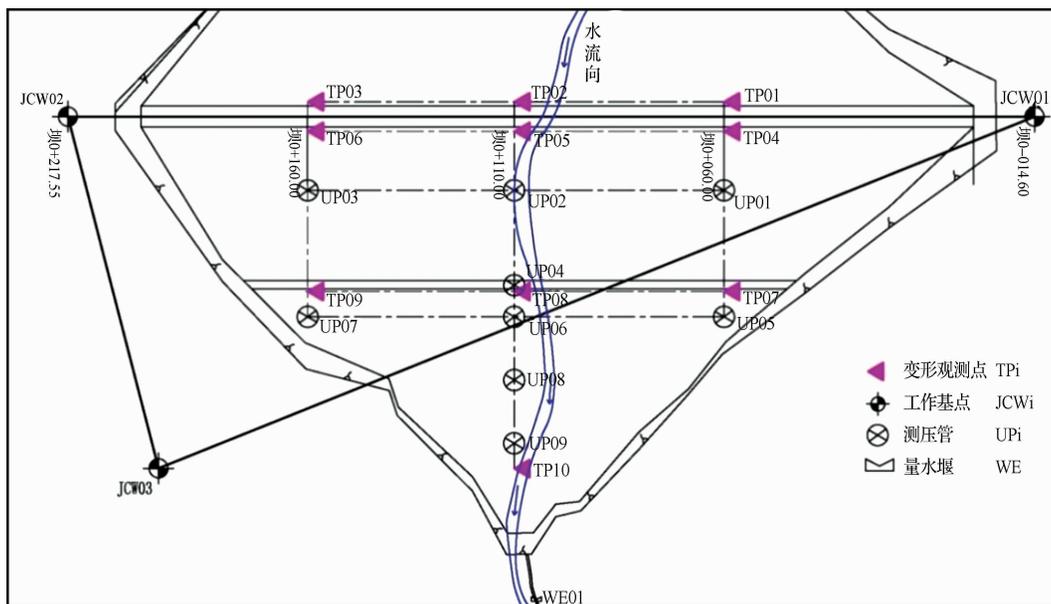


图8 大坝安全监测平面布置

3.5m,下游坝坡2条,距坝轴线分别为41.5m、83.5m。另外,在左、右岸山体表面共布设3个工作基点,编号JCW01~JCW03。水平位移监测采用交会法,垂直位移监测采用三角高程法。

## 5 结语

a. 采用流固耦合模式进行土石坝应力变形分析是切实可行的,计算成果可为坝体安全监测等设计提供科学依据。该工程模型计算的不足之处在于弹性模量、体积模量等部分参数的选取是源于类似工程,但仍能为工程的初步设计与施工处理提供参考。

b. 模拟计算结果表明:纸厂水库大坝黏土心墙堆石坝的应力应变符合一般规律,坝体应力和变形性状较好,黏土心墙最大沉降量355mm,占坝高的0.74%;心墙与堆石料之间沉降差为218mm。沉降量和沉降差均不大。

(上接第43页)鉴于所有工况下,水舌落点皆在出水区内。从安全角度出发,建议对桩号0+628.4m~0+652.0m范围内的出水渠底部采取适当防护措施。

水流试验模拟结果提交设计单位后,经设计优化作局部修改:①将挑坎调角调整为25°,以提高消能效果;②加高挑流段胸墙防护高度0.5m;③挑流消能段

c. 结合FLAC<sup>3D</sup>成果和规范要求,设计布置了测压管、量水堰和变形监测设施,适时监控大坝工作性态。

d. 建议严格控制黏土心墙的施工质量。在施工前,进行现场坝料碾压试验,根据设计指标,确定碾压参数,并结合碾压前后的试验结果,改进施工工艺,尽可能减小坝体沉降。◆

## 参考文献

- [1] 刘瑛珍, 郇能惠. 土石坝与岩土力学技术研讨会论文集. 北京:地震出版社,2001:108-111.
- [2] 胡杨, 朱昱, 杨露. 浅论FLAC3D的应用现状[J]. 科技创新与应用,2016(21):36-41.
- [3] 李梁, 周伟, 刘杏红, 等. 基于参数反演与耦合作用的高堆石坝垫层对坝体渗流影响仿真[J]. 武汉大学学报(工学版),2015(1):39-44+53.
- [4] 刘世煌. 从工程实践试谈水电水利工程安全性评判标准[J]. 大坝与安全,2013(3):10-14+19.

混凝土变更为耐磨混凝土标号C50;④对出水渠底部的素混凝土采取钢筋混凝土防护措施,并延伸河道出流两侧护岸及底部防护范围。目前工程已实现试运行,并经过两个较大洪水期的检验,实测数据基本与试验数据匹配,保障了沿河两岸耕地的安全,工程运用效果良好。◆