

# 超长服役期混凝土坝安全性态评估

——以凰窝水库大坝为例

周凤杰<sup>1</sup>, 徐正飞<sup>2</sup>, 张旭漫<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210000; 2. 连云港市水利局, 江苏 连云港 222000)

**摘要:**随着混凝土坝服役期不断增加,对其进行安全性态评估极为重要。以凰窝水库大坝为例,开展超长服役期混凝土坝安全性态评估研究。通过现场调查分析裂缝成因、扩展趋势对混凝土坝正常运行的影响,进一步计算含裂缝混凝土坝强度及稳定情况,最后对混凝土坝安全性态进行综合评估。结果表明:两种工况下,主、副坝坝踵位置未出现拉应力,坝址处压应力满足规范要求, $K$ 值满足规范要求;由爆炸产生的最大应力达 $4.69 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,发生在大坝的右部顶端,混凝土坝坝顶位置为薄弱部位;凰窝水库大坝最终评估为“三类坝”。

**关键词:**混凝土坝; 裂缝; 超长服役期; 安全评估

中图分类号:TV431

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)09-0050-0005

## Assessment of the safety status of concrete dams with an ultra-long service life: a case study of Huangwo reservoir dam

ZHOU Fengjie<sup>1</sup>, XU Zhengfei<sup>2</sup>, ZHANG Xuman<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China;

2. Lianyungang Water Resources Bureau, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** With the increasing service life of concrete dams, it is very important to evaluate its safety. Taking Huangwo reservoir dam as an example, the safety assessment of concrete dam with ultra-long service life is carried out. Through on-site investigation and analysis of the impact of crack causes and expansion trend on the normal operation of concrete dams, the strength and stability of concrete dams with cracks are further calculated. Finally, the safety of concrete dams is comprehensively evaluated. The results show that under the two working conditions, there is no tensile stress at the heel of the main and auxiliary dams, the compressive stress at the dam site meets the specification requirements, and the  $K$  value meets the specification requirements; The maximum stress caused by explosion is  $4.69 \times 10^5 \text{ Pa}$ , which occurs at the top of the right part of the dam, and the concrete dam crest is the weak part. The Huangwo Reservoir Dam is finally assessed as a “Class III dam”.

**Key words:** concrete dam; cracks; ultra-long service life; safety assessment

收稿日期:2023-06-04

基金项目:江苏省水利科技项目(2021017);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y722003);水利技术示范项目(S1722002ZT1)

作者简介:周凤杰(2000—),女,硕士研究生,主要从事大坝安全评价、大坝安全监测工作。E-mail:fjzhouhri@163.com

混凝土坝是常见的水利工程建筑物,随着服役时间的增加,其服役性能会逐渐降低<sup>[1-2]</sup>,坝体会出现裂缝、老化、破损等现象,严重时甚至会诱发溃坝,威胁下游人民生命财产安全<sup>[3-4]</sup>,因此,对超长服役期的混凝土坝定期进行安全性态评估十分必要。

由相关行业规范标准<sup>[5]</sup>可知,大坝安全评价涉及水库质量评价、运行管理评价、防洪安全评价、渗流安全评价、结构安全评价、抗震安全评价、金属结构评价等内容,强度和稳定是评价混凝土坝结构安全性态的两个重要方面。现用于大坝强度和稳定分析的方法有材料力学法和有限元分析法,但在以往的计算分析中,很少考虑含裂缝的结构强度和稳定分析及爆炸冲击应力对超长服役期坝体安全性态的影响。

本研究以抗日战争期间受投掷炸弹爆炸冲击而产生裂缝的超长服役期凰窝水库大坝为例,首先通过现场检查情况,分析裂缝成因、扩展趋势以及对混凝土坝正常运行的影响,再结合材料力学法计算含裂缝混凝土坝强度及稳定情况,并采用扩展有限元法计算分析爆炸冲击波应力对坝体安全性态的影响,最终对凰窝水库大坝进行安全性态综合评估。

## 1 工程概况

凰窝水库位于江苏省连云港市连云区,现状总库容 36.8 万 m<sup>3</sup>,是一座集防洪、备用供水和生态功能为一体的小(2)型水库。水库流域长约 1.0 km,流域集水面积 1.9 km<sup>2</sup>,干流比降 0.0727。按 20 年一遇洪水设计,设计洪水位 205.60 m;按 200 年一遇洪水校核,校核洪水位 206.30 m;正常蓄水位同溢洪道堰顶高程为 205.00 m。

凰窝水库主、副坝均为混凝土重力坝,坝长分别为 110 m 和 26.60 m,最大坝高 28.21 m,坝顶高程 191.06 m,挡浪墙顶高程 192.06 m。主坝坝体迎水面高程 182.96 m 以上部分竖直,以下部分坡度为 1:0.06,背水面采用台阶型式,坡度为 1:0.7,坝顶宽度 1.09 m;副坝迎水面竖直,背水面坡度 1:0.75,坝顶宽度 1.09 m。坝体底部设置内部廊道,廊道横断面为城门洞型,位于高程 169.00 m 处,断面尺寸为 2.4 m×2.7 m(宽×高),其布置如图 1 所示。

## 2 裂缝现场检查情况

战争期间投掷的炸弹爆炸冲击导致大坝右岸

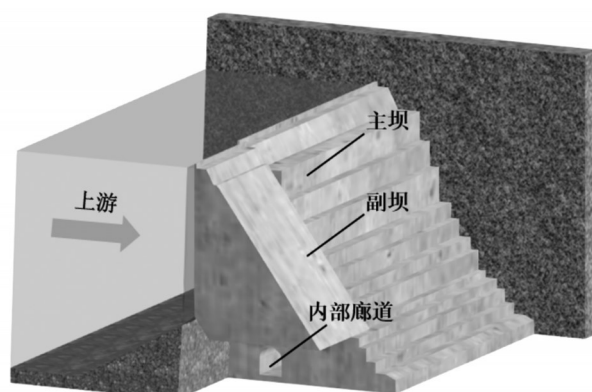


图1 凰窝水库枢纽布置

坝体产生裂缝。大坝上游面、坝顶存在较多裂缝,根据现场调查统计,主要裂缝情况如表 1 所示。

由表 1 可知,主坝、副坝及主副坝结合部位存在多条裂缝,副坝上游面裂缝分布如图 2 所示。主副坝结合部位的结构缝止水存在破损,且缝内充满杂草、漂浮物(图 3),这表明在高水位时可能是渗水通道。主副坝结合部位裂缝(图 4、图 5)近几年来较为稳定,未发现有明显的缝口张开、坝体错位增大的趋势。

## 3 含裂缝混凝土坝强度和稳定计算

### 3.1 材料力学法

#### 3.1.1 计算原理

计算坝体应力时,沿坝轴线取单位宽度的坝体作为固接于地基上的变截面悬臂梁,按平面问题计算。力的方向规定如下:水平力以向下游为正,铅直力以向下为正,力矩以逆时针为正,正应力以压为正。依据《混凝土重力坝设计规范》(SL319—2018),用材料力学法计算大坝的强度,复核大坝的强度性态,计算公式为

$$\sigma_y^u = \frac{\sum W}{T} + \frac{6 \sum M}{T^2} \quad (1)$$

$$\sigma_y^d = \frac{\sum W}{T} - \frac{6 \sum M}{T^2} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_y^u$ ,  $\sigma_y^d$  分别为坝踵和坝趾的垂直正应力;  $\sum W$  为所有荷载的铅直分力之和;  $\sum M$  为所有荷载对形心的力矩;  $T$  为坝底宽度。

依据《混凝土重力坝设计规范》(SL319—2018),用材料力学法计算大坝的抗滑稳定安全系数,计算公式为

$$K = f \frac{\sum W_1 - U}{\sum P} \quad (3)$$

表1 坝体混凝土裂缝汇总(库水位200.80 m)

编号	类型	位置	距竖井/m	距挡浪墙顶/m	缝宽/mm	缝深/m
1	纵向裂缝	副坝	46.7	0~水面	2.0~4.0	> 1.0
2	纵向裂缝	副坝	48.6	0~水面	5.0~10.0	
3	纵向裂缝	副坝	51.1	0~水面	1.0~2.5	
4	纵向裂缝	副坝	51.9	0~水面	1.2~2.0	
5	纵向裂缝	副坝	59.5	0~水面	1.5~3.0	
6	纵向裂缝	副坝	68.5	0~5.8	0.8~2.5	
7	纵向裂缝	副坝	69.4~78.1	4.5~水面	0.3~0.8	
8	斜裂缝	主副坝交接处	35.2		4.0~15.0	> 1.0
9	斜裂缝	主副坝交接处	35.0		2.0~10.0	> 1.0
10	纵向裂缝	主坝	25.2	2.7~水面	1.0~3.0	



图2 副坝右岸坝段上游面裂缝分布



图3 主副坝交界处表面裂缝



图4 主副坝交界处开裂



图5 主副坝交界处结构缝

式中: $K$ 为抗滑稳定安全系数; $f$ 为滑动面上抗剪摩擦系数; $\sum W_i$ 为作用于滑动面以上的力在铅直方向投影的代数和; $U$ 为作用于滑动面上的扬压力; $\sum P$ 为作用于滑动面以上的力在水平方向投影的代数和。

### 3.1.2 计算工况及计算参数

根据《水库大坝安全评价导则》(SL258—2017)中的相关规定和凰窝水库大坝工程实际情况。选

取基本组合和特殊组合两种工况对含裂缝混凝土坝的强度和抗滑稳定进行计算。其中,基本组合考虑设计洪水位(206.19 m)开展计算,特殊组合则考虑校核洪水位(206.54 m)进行计算,两种工况的荷载均为各自水位下的水压力、扬压力、浪压力和坝体自重。工程中未设置防渗帷幕和排水设施,扬压力按照无防渗排水措施时的三角形分布计算。混凝土容重取 $24.0 \text{ kN/m}^3$ ,泊松比取0.167。

3.1.3 计算结果及分析

主坝、副坝材料力学法计算简图见图6,计算荷载见表2,应力计算结果见表4,稳定计算结果见表5。

根据《混凝土重力坝设计规范》(SL319—2018),运用期重力坝坝基面坝踵、坝趾的垂直应力应满足在各种荷载组合下(地震荷载除外),坝踵垂直应力不应出现拉应力,坝趾垂直应力不应大于坝体混凝土容许压应力,并不大于基岩容许承载力。由表3中的强度分析结果可知,在两种荷载工况下,主坝、副坝坝踵处未出现拉应力,坝趾处压应力小于坝体混凝土容许压应力和基岩容许承载力,故主坝、副坝满足强度要求。

根据《混凝土重力坝设计规范》(SL319—2018),

坝基面抗滑稳定安全系数 $K$ 值在基本组合工况下不应小于1.05,特殊组合工况下不应小于1.00,由表4中的稳定计算结果可知:主坝、副坝的抗滑稳定系数满足规范要求。

3.2 有限元计算

3.2.1 有限元模型建立

根据主坝、副坝的实际情况,计算范围取为:上游和下游分别取1.5倍坝高,坝基取1.0倍坝高。X方向以坝轴线为坐标原点,Y方向以高程为坐标。主坝共计7380个单元,副坝共计768个单元。根据炸弹的实际情况,其大小设计为30 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)。X方向以轴线为坐标原点,Y方向以高程为坐标,共计360个六面体八节点单元。创建主坝、副坝及炸弹三维有限元网格图见图7。

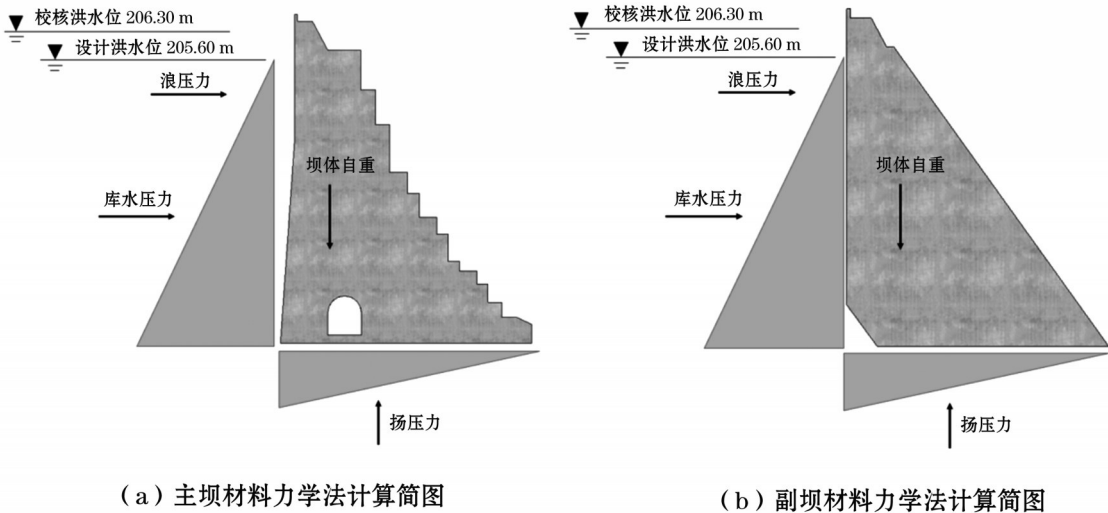


图6 主坝、副坝材料力学法计算简图

表2 主坝、副坝计算荷载

荷载工况	位置	自重/kN	水平水压力/kN	水重/kN	扬压力/kN	浪压力/kN
基本组合	主坝	7 938 211.68	3 732 624.00	1 012 947.60	3 286 332.00	112.57
	副坝	4 698 879.70	2 162 958.49		1 796 599.43	92.42
特殊组合	主坝	7 938 211.68	3 827 892.25	1 073 727.20	3 328 006.50	121.08
	副坝	4 698 879.70	2 235 623.04		1 767 160.75	94.08

表3 主坝、副坝应力计算成果

荷载工况	位置	坝踵 / MPa	坝趾 / MPa
基本组合	主坝	0.153	0.313
	副坝	0.033	0.306
特殊组合	主坝	0.146	0.322
	副坝	0.020	0.321

表4 主坝、副坝稳定计算成果

荷载工况	位置	$K$
基本组合	主坝	1.214
	副坝	1.073
特殊组合	主坝	1.188
	副坝	1.049



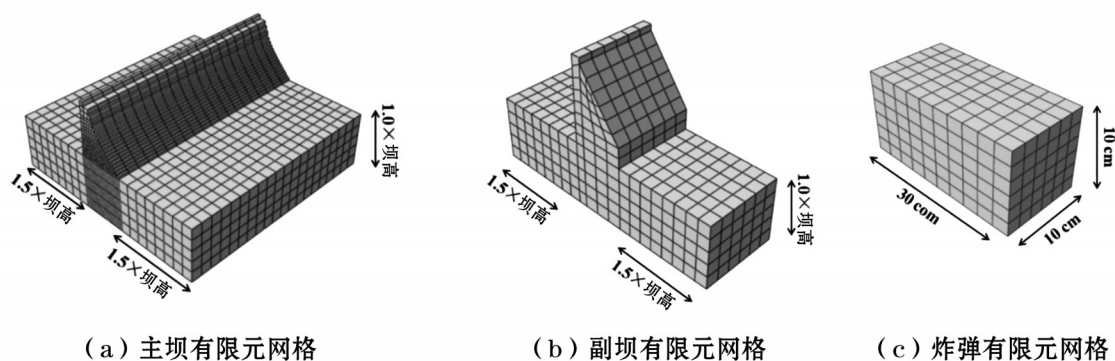


图7 主坝、副坝及炸弹的三维有限元网格图

根据现场实测数据,混凝土大坝各分区的物理学参数见表5。选取92式步兵炮的炮弹作为轰炸炮弹的型号,92式步兵炮采用弹重为3.8 kg的高爆炸弹,不考虑炮弹外壳重量等影响因素,则本次模拟采用的TNT当量为3.8 kg。

表5 三维有限元计算分析参数

材料	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ $\times 10^{10}$ Pa	泊松比
坝体混凝土	24.00	2.00	0.167
基岩	22.00	1.00	0.220

### 3.2.2 有限元计算结果及分析

根据ABAQUS有限元模拟软件计算分析,此次爆炸的应力图见图8。

由图8可知,此次爆炸冲击主要影响主副坝结合处坝体,即大坝右侧顶端。爆炸产生的冲击波

最大应力发生在大坝的右端顶部,应力达到 $4.69 \times 10^5$  Pa。当爆炸位于离大坝较近的空中时,会在爆炸中心附近出现小范围的表层破坏,对大坝整体只有很小的影响。本次爆炸可近似认为近场空中爆炸,爆炸应力主要作用在大坝的主副坝结合处,主要位于混凝土坝坝顶部位,因此坝顶为大坝范围内较薄弱位置。

## 4 结 论

### 4.1 结论

(1)由现场检查情况,凰窝水库大坝主坝、副坝及主、副坝结合部位有多条裂缝,且高水位时为渗水通道,影响结构耐久性,对大坝安全不利。

(2)经采用材料力学法计算,主、副坝坝踵位置未出现拉应力,坝址处压应力满足规范要求,抗滑稳定系数 $K$ 值满足规范要求。

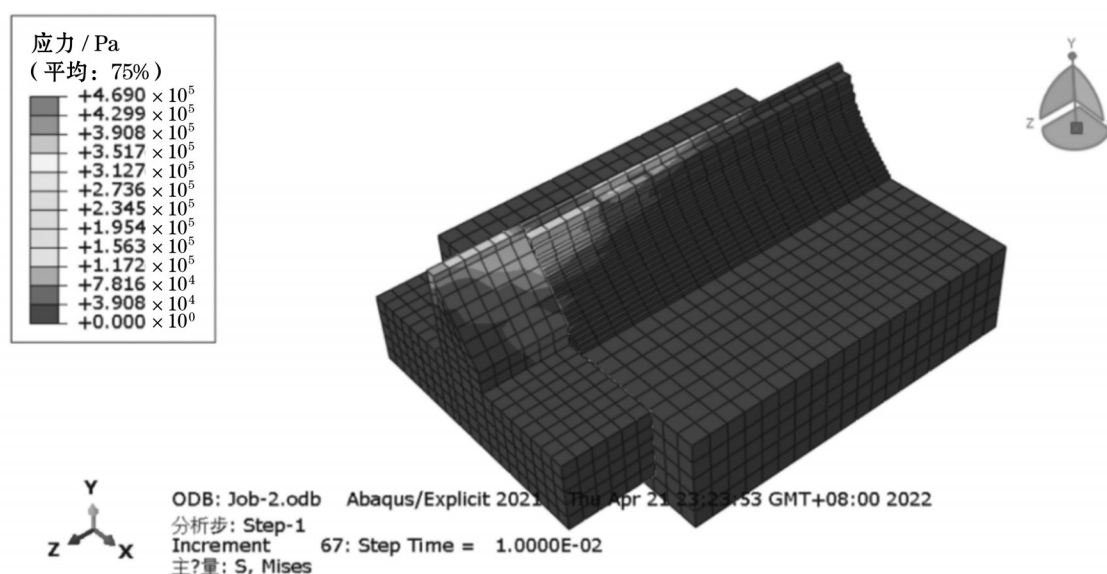


图8 爆炸应力分布

- [6] 贺振洲,崔康平,慈曾福,等. 新型复合药剂原位修复河道底泥污染[J]. 环境工程学报,2017,11(6):3481-3486.
- [7] 丁文川,曾晓岚,王永芳,等. 生物炭载体的表面特征和挂膜性能研究[J]. 中国环境科学,2011,31(9):1451-1455.
- [8] SONG B, ZENG G M, GONG J L, et al. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals [J]. Environment international, 2017, 105(8):43-55.
- [9] 余光伟,雷恒毅,刘康胜,等. 治理感潮河道黑臭的底泥原位修复技术研究[J]. 中国给水排水,2007,23(9):5-9,14.
- [10] PAN L. Development of advanced water treatment technology using microbubbles [D]. Tokyo: Keio University, 2006.
- [11] 万金保,吴声东,江水英. 臭氧化污泥减量技术的研究进展[J]. 化工进展,2007,26(11):1583-1586.
- [12] YAFENG NIE, CAIHONG LU, BO LIU. Research progress: reduction of excess sludge by ozone in the sewage biotreatment process [C] //Progress in Environmental Science and Engineering. Part 3: Trans Tech Publications, 2012:2410-2415.
- [13] 汪启光. 污泥臭氧破解及其减量的机理与效能研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [14] 王正,王琳,王宝贞,等. 臭氧污泥减量过程中混合液各参数的变化[J]. 城市环境与城市生态,2007(3):11-14.

(上接第54页)

(3)经采用有限单元法计算分析,由爆炸产生的最大应力达 $4.69 \times 10^5$  Pa,发生在大坝的右部顶端,因此混凝土坝坝顶位置应为重点关注的薄弱部位。

#### 4.2 建议

尽快进行除险加固、消除安全隐患,主要措施如下:

(1)修补处理坝体裂缝和结构缝止水,补强上游面破损的防渗砂浆和下游坝面老化破损的混凝土,提高大坝结构整体性和防渗体系完整性。

(2)隐患消除前采取控制运用措施,加强检查监测与应急管理,保障水库大坝安全。

(4)由于混凝土坝老化现象严重,且坝体存在多条裂缝,工程存在严重的安全问题,凰窝水库大

坝最终应评估为“三类坝”。

#### 参考文献:

- [1] 蔡跃波,向衍,盛金保,等. 重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J]. 岩土工程学报,2023,45(3):441-458.
- [2] 顾冲时,苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):1-12.
- [3] 谷艳昌,王士军,庞琼,等. 基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定研究[J]. 水利学报,2017,48(4):480-487.
- [4] 葛巍,焦余铁,李宗坤,等. 溃坝风险后果研究现状与发展趋势[J]. 水科学进展,2020,31(1):143-151.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则:SL 258—2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.