

基于混凝土双轴强度准则的重力坝可靠度分析

柯书武^{1,2}, 于强^{1,2}, 柯济民^{1,2}

(1. 江西丰饶工程监理有限公司, 江西 上饶 334000; 2. 江西丰饶水利工程质量检测有限公司, 江西 鹰潭 335000)

摘要: 目前重力坝的可靠度研究主要集中在建基面抗滑稳定等方面, 对基于不同强度准则的重力坝可靠度分析研究成果相对较少. 本文首先介绍了采用的双轴强度准则、广义随机空间内的可靠度分析方法, 然后采用线弹性有限元法, 对基于混凝土双轴强度准则的某重力坝可靠度进行了分析.

关键词: 线弹性; 双轴强度准则; 重力坝; 可靠度

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2018)06-0415-04

0 引言

目前, 国内外对重力坝的可靠度研究主要集中在建基面抗滑稳定等方面^[1-6], 对基于不同强度准则的重力坝可靠度分析研究成果相对较少. 混凝土强度准则有多种, 包括垂直抗拉准则、单轴拉伸准则、双轴强度准则等. 因为双轴强度准则考虑了第三主应力为压应力时对坝体开裂的产生的影响, 因此采用双轴强度准则更加合理. 本文采用线弹性有限元法对基于混凝土双轴强度准则的重力坝可靠度进行研究.

1 计算原理

1.1 混凝土双轴强度准则

我国混凝土结构设计规范 GB50010-2010 将混凝土的多轴强度在附录中专门列出. 它规定, 在双轴应力状态下, 混凝土的设计强度值按图所示的包络图取值, 在不同平面应力区的破坏包络线为多段折线, 混凝土双轴强度包络图见图 1. 以应力比表示的极限状态方程分别为^[7]:

(1) 二轴压压: $\sigma_1 = 0, \alpha_1 = f_2/f_3 > 0$

当 $\alpha_1 \geq 0.2$ 时,

$$f_c + f_3/1.2 = 0, f_c + f_2/1.2\alpha_1 = 0 \quad (1)$$

当 $\alpha_1 \leq 0.2$ 时,

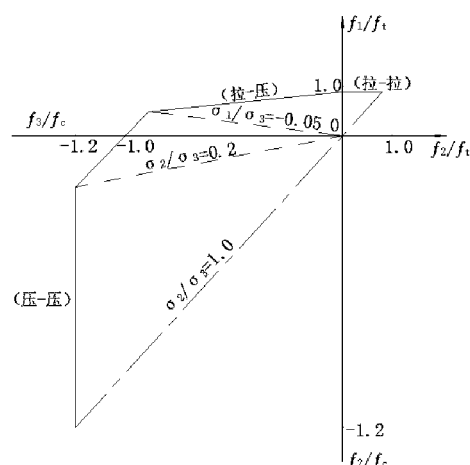


图1 混凝土双轴强度包络图

$$f_c - f_3/\frac{1.2}{\alpha_1 - 1.2} = 0, f_c - f_2/\frac{1.2\alpha_1}{\alpha_1 - 1.2} = 0 \quad (2)$$

(2) 二轴拉压: $\sigma_2 = 0, \alpha_2 = f_1/f_3 < 0$

当 $\alpha_2 > -0.05$ 时,

$$f_c - f_3/\frac{1.2}{\alpha_2 - 1.2} = 0, f_t - f_1/\frac{1.2\alpha_2 f_c}{\alpha_2 - 1.2f_t} = 0 \quad (3)$$

当 $\alpha_2 < -0.05$ 时,

$$f_c - f_3/\frac{f_t/f_c}{\alpha_2 + 0.05 - 1.07143f_t/f_c} = 0, \quad (4)$$

$$f_t - f_1/\frac{\alpha_2}{\alpha_2 + 0.05 - 1.07143f_t/f_c} = 0, \quad (5)$$

(3) 二轴拉拉: $\sigma_3 = 0, \alpha_3 = f_2/f_1$

$$f_t - f_1 = 0, f_t - f_2/\alpha_3 = 0 \quad (6)$$

其中, f_c, f_t 分别为混凝土单轴抗压和单轴抗拉强度设计值, f_1, f_2, f_3 的含义与 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 相同。

1.2 相应于某一功能函数的可靠指标计算公式

用广义随机空间内的可靠度分析方法计算出对应的可靠指标和设计验算点,其计算公式为^[8]:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{p^*} (\mu_{x_i} - x_i^*)}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{x_i' x_j'} \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} \bigg|_{p^*} \sigma_{x_i'} \sigma_{x_j'} \right)^{1/2}} \quad (7)$$

$$x_i = \mu_{x_i'} + \beta \alpha_i' \sigma_{x_i'} \quad (8)$$

式中: $\frac{\partial g}{\partial x_i}$ 表示导数在验算点 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 处取值, $\mu_{x_i'}$ 和 $\sigma_{x_i'}$ 分别为当量正态分布随机变量 x_i' 均值和标准差, $\rho_{x_i' x_j'}$ 为变量 x_i' 与 x_j' 的相关系数, α_i' 为灵敏系数。

1.3 计算步骤

将有限元算法与上面的可靠度分析方法相结合,即可进行基于混凝土双轴强度准则的重力坝点可靠度分析。其具体过程为:

- (1) 在均值点处进行线弹性有限元分析;
- (2) 选定迭代初值 $x^0 = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})$;
- (3) 求非正态变量的正态当量均值 $\mu_{x_i'}$ 和标准差 $\sigma_{x_i'}$;
- (4) 根据双轴强度准则公式求功能函数 $g(x)$ 的值;
- (5) 根据式(8)求得新的验算点值 x^* ;
- (6) 判别 $g(x)$ 是否满足精度要求,若不满足则重复步骤(3)~(5);
- (7) 根据式(7)求得可靠指标 β ;
- (8) 对单元和高斯点进行循环,求出单元的每个高斯点的可靠指标;
- (9) 对上述结果进行整理,求出所有结点的可靠指标。

2 实例分析

某混凝土重力坝,坝顶高程 384.00 m,最大坝高 162.00 m,坝顶长度 896.26 m;左岸坝后厂房和右岸地下厂房各装 4 台 800 MW 机组。

2.1 坝体剖面 and 有限元网格

对泄 4 坝段进行了精细模拟,考虑了中孔和表孔的影响,对地基进行了简化。其中主滑面与水平面夹角为

26°,滑出面与水平面夹角为 45°,计算剖面见图 2。

根据计算要求,对泄 4 坝段建立了有限元模型,采用平面四节点等参单元进行离散。坐标系取为与坝体坐标一致, x 轴沿顺河向,向下游为正, y 轴为竖向,向上为正。坝基分别从坝踵和坝趾向上、下游延伸 300.00 m,基础深度也取 300.00 m。未考虑廊道的影响。坝基简化为均质坝基。其中溢流坝段考虑上部导墙结构宽度为 6.00 m,中孔的宽度 14.00 m,坝段宽度为 20.00 m。采用广义接触面单元模拟建基面和深层滑动面。有限元网格离散为 7 742 个单元,7 963 个节点,有限元网格见图 3。

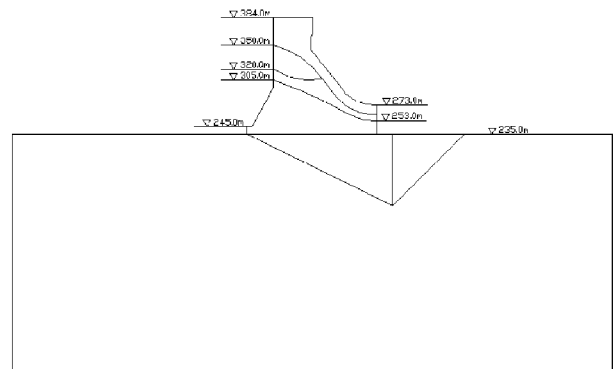


图2 坝体剖面图

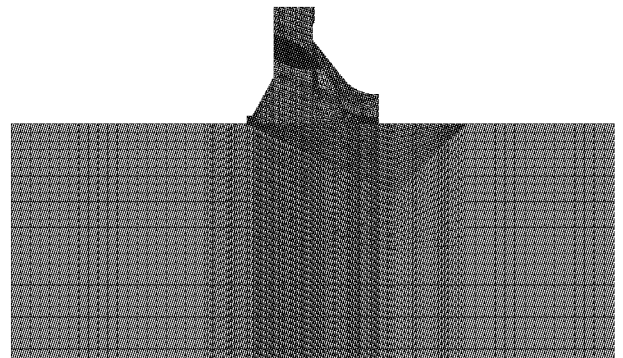


图3 初始有限元网格

2.2 荷载

- (1) 自重: 坝体容重 24 kN/m³, 基岩容重 26 kN/m³。
- (2) 静水压力: 上游水位 380.00 m, 下游水位 265.80 m。
- (3) 扬压力: 坝基面扬压力按考虑抽排降压效果计算。扬压力计算对应的排水孔位置及采用的系数见表 1。
- (4) 淤沙压力: 百年淤沙高程 310.00 m, 淤沙浮容

重 7.8 kN/m^3 , 内摩擦角 12° 。

表 1 泄 4 坝段排水孔位置与扬压力系数

项目		建基面
排水孔位置	主排水孔桩号/m	0 + 26.5
	副排水孔桩号/m	0 + 56
	下游副排水孔桩号/m	0 + 160
扬压力系数	主排水孔前的扬压力强度系数 α_1	0.2
	残余扬压力强度系数 α_2	0.5
备注	设置防渗帷幕及主、副排水孔并抽排	

2.3 力学参数与随机变量统计参数

泄 4 坝段各材料分区的物理力学参数标准值见表 2, 随机变量统计参数见表 3。

表 3 泄 4 坝段随机变量统计参数表

随机变量	上游水深/m	上游扬压力折减系数	下游水深/m	混凝土弹模/kPa	混凝土抗拉强度/kPa	混凝土抗压强度/kPa
均值	145	0.185	30.8	1.96E7	1 890	22 240
变异系数	0.06	0.3	0.06	0.1	0.2	0.2
分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态
随机变量	建基面摩擦系数	建基面凝聚力/kPa	软弱结构面摩擦系数	软弱结构面凝聚力/kPa	抗力体摩擦系数	抗力体凝聚力/kPa
均值	1.16	1060	0.42	141	0.96	1128
变异系数	0.2	0.35	0.2	0.35	0.2	0.35
分布类型	正态	对数正态	正态	对数正态	正态	对数正态

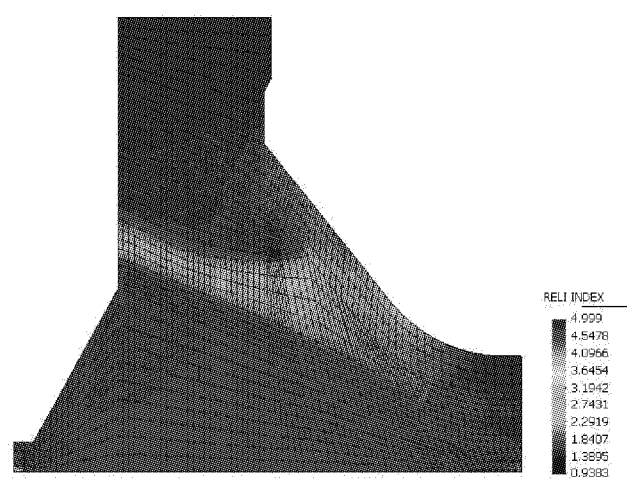


图 4 双轴强度准则对应的坝体可靠指标

3 结 语

(1)采用线弹性有限元法和广义随机空间内的可

表 2 泄 4 坝段各区材料主要物理力学参数标准值

材料分区	弹模 /(10^4MPa)	泊松比	容重 /(kN/m^3)
坝体混凝土	1.96	0.167	24.0
基础	1.2	0.25	26.0

注:基础简化为均质地基,材料参数取 III1 岩石对应的参数。

2.4 计算结果及分析

由图 4 可知,可靠指标最小值在坝踵附近,说明坝体最有可能破坏的地方在坝踵附近,这是因为坝踵处局部拉应力集中的缘故。在中孔和表孔附近,可靠指标也相对较小,这是因为泄水孔附近的坝体被削弱,应力状态比较复杂,设计与施工时也要重点关注。

靠度分析方法,对基于混凝土双轴强度准则的某重力坝可靠度进行了分析,得到了坝体不同部位的点可靠指标。

(2)采用有限元法计算重力坝的可靠指标,可以考虑孔口和坝体局部应力集中以及地基的影响,结果与实际情况相符。

参考文献:

[1] 陈祖煜,徐佳成,孙平,等.重力坝抗滑稳定可靠度分析:(一)相对安全率方法[J].水力发电学报,2012,31(3):148~159.
[2] 陈祖煜,徐佳成,陈立宏,等.重力坝抗滑稳定可靠度分析:(二)强度指标和分项系数的合理取值研究[J].水力发电学报,2012,31(3):160~167.
[3] 秦净净,王刚,管莉莉.基于几何优化算法的重力坝坝基抗滑稳定可靠度分析[J].水力发电,2015,41(4):39~42.
[4] 江胜华,侯建国,何英明.重力坝深层抗滑稳定的体系可靠度分析[J].中国农村水利水电,2013(3):91~94.
[5] 李同春,房丹丹,王志强.基于有限元响应面法的重力坝抗拉可靠度分析[J].水利水电工程学报,2009(4):100~104.

- [6] 王志强,胡国平. 基于线弹性随机有限元重力坝抗压可靠度分析 [J]. 江西水利科技,2013,39(1):34~36. 出版社,2000.
- [7] GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S].
- [8] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

编辑:张绍付

Reliability analysis of gravity dam based on concrete biaxial strength criterion

KE Shuwu^{1,2}, YU Qiang^{1,2}, KE Jimin^{1,2}

(1. Jiangxi Fengrao Engineering Supervision Co. LTD, Shangrao 334000, China;

2. Jiangxi Fengrao Hydraulic Engineering Quality Inspection Co. LTD, Yingtan 335000, China)

Abstract: At present, the reliability research of gravity dams mainly focuses on the anti-sliding stability of the foundation surface, but there are little literatures on the reliability analysis of gravity dams based on different strength criteria. This paper first introduces the biaxial strength criterion adopted, reliability analysis method in generalized random space, then using the linear elastic finite element method, the reliability of gravity dam based on biaxial strength criterion is analyzed.

Key words: Linear elastic; Biaxial strength criterion; Gravity dam; Reliability

翻译:柯书武

鄱阳湖模型基地和水保科技园 入选江西省首批中小學生研学实践教育基地

近日,江西省教育厅公布了江西省首批中小學生研学实践教育基地名单。其中鄱阳湖模型试验研究基地和江西水土保持生态科技园成功入选。

此次评选是在省直有关部门和各设区教育行政部门推荐基础上,经专家评议并公示,共评选出 64 个基地。鄱阳湖模型试验研究基地是由江西省水利科学研究院鄱阳湖模型试验研究基地管理中心申报,基地地址在江西省九江市共青城市富华大道 167 号。江西水土保持生态科技园是由江西省水土保持科学研究院申报,基地地址在江西省九江市德安县德安大道 999 号,这两大基地将进一步加强教学设施、安全设备等基础设施建设,为广大中小學生开展研学实践提供优质课程和服务,促进广大中小學生健康成长、全面发展。

(江西省水利厅宣发中心 万 菁)