

复杂地基重力坝深层抗滑模拟研究

王振¹, 韩春¹, 宋志斌², 王延梅¹

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 重力坝抗滑稳定性关系到水库地整体安全, 极为重要。本文采用离散元法对含层理、节理等复杂结构面的坝基抗滑稳定性进行了数值模拟研究, 计算了不同地质条件下水库无蓄水、水库蓄满两种工况的坝体稳定性。研究表明: 水库在无蓄水时, 坝体稳定性都比较好, 但当水库蓄满后, 坝体稳定性受地质环境影响显著, 多滑动面形式比双滑动面形式更有利坝体稳定, 并且与重力坝的重心位置有关。本文提出的方法与计算结果, 可供复杂地质条件下重力坝设计参考。

关键词: 复杂地质条件; 重力坝; 深层抗滑模拟; 稳定性

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0063-03

Simulation of deep anti-sliding of gravity dam on complex foundation

WANG Zhen¹, HAN Chun¹, SONG Zhibin², WANG Yanmei¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. School of Hydraulic, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The anti-sliding stability of gravity dam is always related to the overall safety of reservoir, and is very important. The paper adopted discrete element method to simulate the stability of dam base of complex structure surface that included bedding and joints. It also calculated the stability of dam body under two conditions of empty and full reservoir in different geological conditions. Study shows that the stability of dam is good when the reservoir is empty, while the reservoir is full of water, the stability of dam is affect significantly by the geological condition. Multiple sliding surface form are more better than double sliding surface form for the stability of dam. The stability is related to the position of the gravity dam centre. The results can be used for the design of gravity dam under complex geological condition.

Key words: complex geological condition; gravity dam; deep anti-sliding simulation; stability

重力坝的坝基与坝体的稳定性问题是水库工程建设中的关键技术问题, 特别是复杂地基重力坝抗滑安全稳定必须进行分析^[1-3]。过去对坝基含结构面的重力坝抗滑稳定性分析, 大多采用理论分析或数值解析^[4], 规范推荐的刚体极限平衡法对于解决含有复杂结构面坝基稳定性问题比较困难^[5]。随着计算机的发展和数值计算软件的广泛应用, 数值模拟方法成为进行重力坝深层抗滑分析的重要手段。本文用离散元法对建立在复杂地质条件下的重力坝抗滑稳定性进行模拟研究, 探索出可用于复杂结构面地基下重力坝建坝可行性方案的一种数值模拟方法。

1 工程算例

本文中重力坝坝体材料为混凝土, 坝体密度为

2 400 kg/m³, 弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2, 模型尺寸如图 1 所示。在模型中有一组倾角为 30°、间距为 50 m 的节理组和一个与其交错的节理, 倾角如工况图所示。岩体和结构面参数如表 1 所示。在算例分析中, 坝体采用线弹性模型^[6-7], 坝基岩体和结构面采用弹塑性模型, 屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 屈服函数为:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_t \quad (2)$$

式中: $N_\varphi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$; φ 为内摩擦角; σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力; c 为粘聚力; σ_t 为抗拉强度。

当岩体内部某一点应力满足 $f_s < 0$, 就发生剪切屈服; 当岩体内部某一点应力满足 $f_t > 0$, 发生张拉屈服。

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272325); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2011NJ012)

作者简介: 王振(1987-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事节理岩体可靠度分析方面的研究。

表 1 岩块变形和强度参数 kg/m ³ , GPa, (°), MPa					
密度	弹性模量	泊松比	内摩擦角	抗拉强度	粘聚力
2600	45	0.25	30	1.2	1.8

表 2 节理变形和强度参数 MPa/m, (°), MPa				
法向刚度	剪切刚度	内摩擦角	抗拉强度	粘聚力
1400	1000	30	0.4	2.0

2 计算原理

本文对重力坝抗滑稳定性进行分析时,将坝体与坝基间看成一个接触面,而非胶结面,接触面呈水平,其抗滑安全稳定系数为:

$$K_s = f \cdot \frac{\sum W - U}{\sum P} \tag{3}$$

式中: $\sum W$ 为接触面上的总重力; $\sum P$ 为接触面上的总水平力; U 为作用在接触面上的扬压力; f 为接触面间的摩擦系数。

当坝基内含有缓倾角软弱结构面时,在水平荷载作用下,坝体有可能连同部分坝基沿着软弱结构面进行滑移,即所谓深层滑动。本文中均为双斜面深层滑动情形,计算时采用等安全系数法。等 K 法安全系数计算公式中各个符号说明参见混凝土重力坝设计规范(SL319 - 2005)^[8-9]。

3 计算过程及结果分析

3.1 模拟工况 1

图 2 为计算工况 1 模型。由图 2 模型可以看

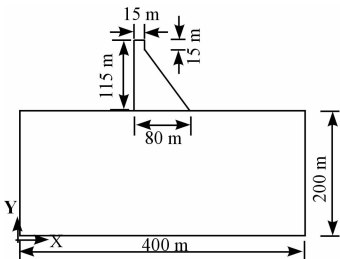


图 1 计算模型

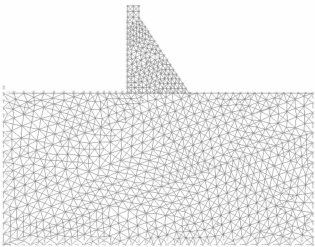


图 2 计算工况 1



图 3 横向位移云图(空库)

3.3 模拟工况 3

在工况 3 的算例分析中,首先模拟了空库下坝体和坝基的变形和应力分布,最大横向与竖向位移均发生在坝顶部位,且大小和前两种工况相差不大。空库情况下稳定性较好。当库满时,主应力分布发生变化,主应力分布图见图 13 所示。由图可以看出,此时最大主应力为 45.52 MPa,最小主应力为 -

出,工况 1 坝基滑动面为双滑动面形式,当水库无蓄水时,坝体在自重应力作用下,最大主应力为 0.144 MPa,最小主应力为 -5.41 MPa,产生横向位移云图和竖向位移云图分别如图 3、4 所示。

由图 3、4 可以看出,在无蓄水时,坝体和坝基会产生较小位移,横向与纵向最大位移均在坝顶产生,坝体稳定性较好。在水库蓄满水时,坝体和坝基应力发生重分布,主应力分布图见图 5。由图 5 可知,在水库蓄满时,最大主应力为 12.212 MPa,最小主应力为 -8.132 MPa。此时坝体和坝基横向位移云图见图 6,竖向位移云图分别见图 7。由图 6、7 可见,在满库情况下,坝体和坝基会产生位移较空库情形下显著增加,由于坝基和坝体向右移动,坝体下游岩体向上位移过大,直接威胁到坝体下游的岩体稳定,坝基向右滑动。坝体和坝基稳定性受到威胁^[10]。这种工况下不适合建立较高形重力坝。

3.2 模拟工况 2

在工况 2 情况下,坝基沿着多滑动面滑动,同样对这种工况进行了空库和满库的模拟分析,得出空库情况下,坝体和坝基位移与应力分布和工况 1 基本一样。可见在空库情况下,重力坝稳定性基本不受地基结构面的影响。库满情形下,坝体与坝基主应力分布图如图 9 所示。

由图 9 可知,最大主应力为 6 MPa,最小主应力为 -6.028 MPa。坝体和坝基横向位移云图与竖向位移云图见图 10、11。由图 10、11 可知,在这种工况下,坝体和坝基在横向和竖向位移都比较小,满足稳定性要求。这样的地基条件,适合建立高重力坝。

7.747 MPa。此时坝体和坝基的横向位移云图与竖向位移云图见图 14、15。

由图 14 可以看出,在这种工况下,横向位移较小,但是滑移体较大,以至于使坝体下游的表层岩体被顶起,由图 15 可以看出。这种工况坝体和坝基稳定性介于工况 1 与工况 2 之间。

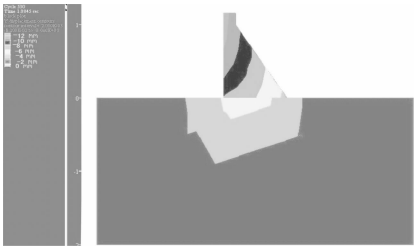


图 4 竖向位移云图(空库)

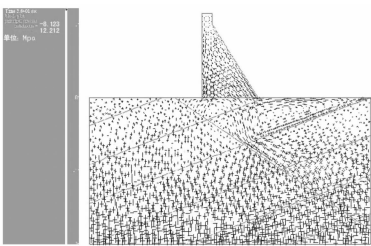


图 5 主应力分布图(满库)

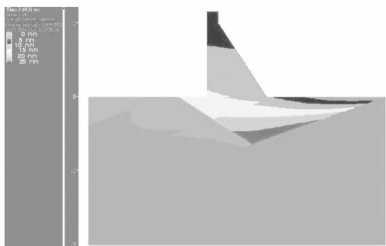


图 6 横向位移云图(满库)



图 7 竖向位移云图(满库)

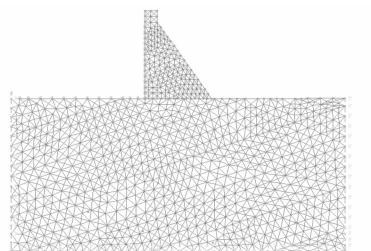


图 8 计算工况 2

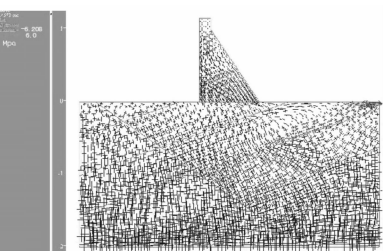


图 9 主应力分布图(满库)



图 10 横向位移云图(满库)

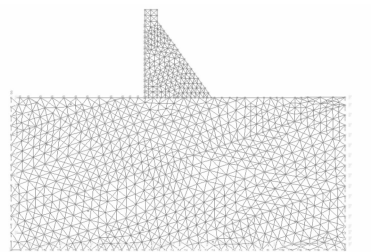


图 11 竖向位移云图(满库)

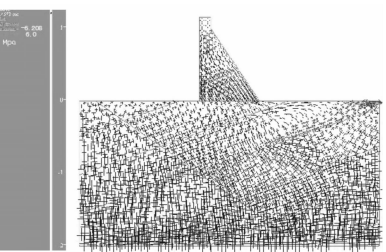


图 12 计算工况 3



图 13 主应力分布图(满库)

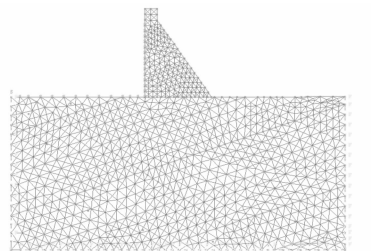


图 14 横向位移云图(满库)

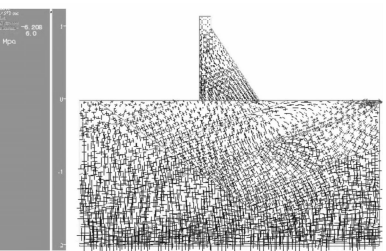


图 15 竖向位移云图

3.4 安全系数

在 Udec 中用 solve fos 命令就可以输出安全系数,等 K 法计算原理在文献[10]中进行了详细的说明,对 Udec 与刚体极限平衡等 K 法计算所得结果进行对比,如表 3。

表 3 Udec 与等 K 法计算结果对比

计算方法	Udec	等 K 法
工况 1	2.73	2.69
工况 2	3.97	3.85
工况 3	3.24	3.16

由表 3 可知,用 udec 计算所得的安全系数与等

k 法相差不大,3 种工况下,用 Udec 计算所得安全系数均大于用等 K 法计算所得结果,因未考虑渗流,但均在允许范围内,这与学者王辉等所得结论相符^[10]。

4 结 语

本文采用离散元法,对含结构面的复杂地质条件下重力坝抗滑稳定性进行了数值模拟,得出以下结论:

(1)采用离散元法可以较好地复杂地基条件下重力坝抗滑稳定性进行模拟。

理论分析与实例应用表明,模糊四元联系数可有效解决评价因子众多的模糊不确定问题,基于改进 FAHP 的权重计算方法较之传统的层次分析法更为客观和精确。因此,将该方法应用于水资源可持续利用评价是合理有效的,并且具有一定的优势。

参考文献:

- [1] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 王本德, 于义彬, 王旭华, 等. 考虑权重折衷系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 6-10.
- [3] 金菊良, 张礼兵, 魏一鸣. 水资源可持续利用评价的改进层次分析法[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 227-232.
- [4] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [5] 李睿冉, 毛晓敏, 王 慧. 四元联系数在区域水资源与社会经济协调发展评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010(8): 81-84.
- [6] 李 永, 胡向红, 乔 箭. 改进的模糊层次分析法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 11-13.
- [7] 周维博, 马 艳, 董艳慧, 等. 西安市水资源可持续开发利用程度模糊综合评价[C]//. 变化环境下的水资源响应与可持续利用, 中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集, 大连: 大连理工大学出版社, 2009: 441-447.
- [8] 薛宏智, 周维博. 基于改进 AHP 定权的序法在地下水水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程, 2012, 23(3): 44-47.
- [9] 周维博, 董起广, 舒媛媛, 等. 延安市水中长期供求规划[R]. 延安: 延安市水务局, 2012, 12.
- [10] 宋松柏, 蔡焕杰. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2005.
- [11] 刘丹丹. 陕北地区水资源可持续利用评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学. 2008.
- [12] 邓朝贤, 金菊良, 王宗志, 等. 基于模糊四元联系数的防洪工程体系安全综合评价模型[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 41-43, 53.

(上接第 65 页)

(2) 在水库蓄满状态下, 工况 2 地质条件下多滑动面形式比工况 1 双滑动面形式更有利于重力坝抗滑稳定性要求。

(3) 对比工况 2、3 地质条件下水库蓄满状态可知, 对于多面滑移情况下, 坝体重心在主滑动面上的垂点, 越靠后越有利于坝体的稳定。

(4) 本文的模拟研究方法 with 计算结论可以为重力坝勘察设计提供一定的指导。

(5) 3 种工况用 Udec 所得安全系数均大于等 K 值法, 但均在允许范围内。工况 2 安全系数最大, 工况 1 安全系数最小。

参考文献:

- [1] 曹去修, 柏宝忠, 王贵明. 重力坝深层抗滑稳定极限状态设计式探讨[J]. 人民长江, 2003, 34(7): 40-42.
- [2] 周 伟, 常晓琳, 徐建强. 基于分项系数法重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 315-320.
- [3] 黄东军, 聂广明. 重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考——兼对《对重力坝设计规范中双斜滑动面抗滑稳定分析公式讨论意见的答复》[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 90-95.
- [4] 郭怀志, 黄东军. 重力坝抗滑稳定可靠度分析的数值方法[J]. 水利水电技术, 1988, 19(10): 33-37.
- [5] 周 泽, 周 峰, 潘军校, 等. 重力坝深层抗滑稳定性计算探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1719-1722.
- [6] 李林科, 张爱军. 混凝土重力坝三维数值模拟及优化设计[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 125-127+130.
- [7] 姚艳华, 彭 刚, 陈灯红. 不同地基弹模对重力坝动力特性的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(6): 117-120.
- [8] 王宏硕, 翁情达. 水工建筑物(专题部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [9] 王 辉, 常晓琳, 周 伟, 等. 基于流固耦合的重力坝深层抗滑稳定离散元分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 48-53.
- [10] 谷俊芹, 苏志敏, 武亮, 等. 可靠度理论在重力坝变形观测中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(4): 938-941.