

# 重力坝抗滑稳定性分析有限元模拟

李林岭, 郭亚茹

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月29日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月30日

## 摘要

重力坝抗滑稳定是影响工程安全的关键问题之一。重力坝通常建在复杂的基础之上, 由于多个脆弱的结构平面形成自然滑动路径, 保持其稳定性可能非常具有挑战性。本文对混凝土重力坝进行二维数值模拟, 并对混凝土重力坝的抗滑稳定性进行了数值模拟分析。对各工况下的抗滑稳定性进行分析, 模拟分析其应力状况以及位移变化的大小情况, 计算各个抗滑稳定系数是否在规定的范围内, 以此判断重力坝的抗滑稳定性。计算结果表明, 模拟能自然地描述重力坝错位、开度和滑动等不连续的过程。此外, 该方法具有适应性好、计算方便、兼容性高等特点, 可作为重力坝抗滑稳定性分析的有效方法。

## 关键词

重力坝, 抗滑稳定性, 有限元

# Finite Element Simulation of Anti-Sliding Stability Analysis of Gravity Dam

Linling Li, Yaru Guo

School of civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Slip stability of gravity dams is one of the key issues affecting project safety. Gravity dams are usually built on complex foundations, and maintaining their stability can be very challenging due to multiple vulnerable structural planes forming natural sliding paths. In this paper, a two-dimensional numerical simulation of concrete gravity dams is performed and the slip resistance stability of concrete gravity dams is analyzed by numerical simulation. The slip resistance stability analysis under each working condition is calculated, the stress condition as well as the magnitude of the displacement change is simulated, and whether each slip resistance stability coefficient is within the

specified range is calculated, so as to judge the slip resistance stability of the gravity dam. The computational results show that the simulation can naturally describe the discontinuous processes such as dislocation, opening and sliding of gravity dams. In addition, the method is characterized by good adaptability, convenient calculation, high compatibility, etc., which can be used as an effective method for the analysis of slip resistance stability of gravity dams.

## Keywords

Gravity Dam, Stability against Sliding, Finite Element

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

重力坝自重大、施工简单、造价低廉,耐腐蚀性耐抗性较好,是目前最常见的挡水建筑物结构型式之一[1]。同时,重力坝也由于缺少卵榫、桩基结构与地基土体增加嵌入度,其抗滑稳定基本靠自重产生的摩擦力来提供[2]。我国西南地区正在或即将修建许多高坝和大型水库。大部分工程都位于高山和深谷的河流上,抗滑稳定性是重力坝研究中的一个重要内容,一直受到相关研究人员的广泛关注[3]-[5]。

现阶段,分析重力坝抗滑稳定性的方法有很多种,比较经典的方法有刚体极限平衡法(LEM)、有限元法(FEM)、不同元法(DEM)和不连续变形分析(DDA)等[4] [6]-[8],由于坝基地质条件十分复杂,重力坝工程的防滑稳定性较严重,因为多个结构平面产生自然滑道。本文采用有限单元法方法对该问题进行了研究。有限单元法能够大大提高计算精度,反映重力坝内部节点的应力和位移分布,了解应力集中程度及分析易出现变形破坏的部位。结合有限单元法,对混凝土重力坝进行抗滑稳定性分析[9]。

为进一步研究重力坝抗滑稳定性问题,本文模拟混凝土重力坝为研究对象,借助二维有限元软件计算[10]其抗滑抗倾稳定性,再与规范公式进行比较,探讨采用数值模拟法计算,研究重力坝抗滑稳定性的可能性及计算研究精度。

## 2. 有限元基础理论

有限元法的基本思想是将连续解区域离散化成一组以某种方式连接在一起的有限元,然后利用每个元中假定的近似函数表示整个解域中要求解的未知场函数[11]。解了这些未知数后,就可以用插值函数计算出各元素中的场函数的近似值,得到整个解域的近似解。

有限元的静力平衡方程如下:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

其中 $[K]$ 是刚度矩阵,  $\{\delta\}$ 是位移向量,  $\{F\}$ 是荷载矩阵。

有限元动力平衡方程如下:

$$[K]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [\bar{M}]\{\ddot{\delta}\} = \{R_0\} \quad (2)$$

其中 $[C]$ 是阻尼矩阵,  $[\bar{M}]$ 是总质量矩阵,  $\{\dot{\delta}\}$ 是速度向量,  $\{\ddot{\delta}\}$ 是加速度向量,  $\{R_0\}$ 是动载荷矩阵。

$$[\bar{M}] = [M] + [M_p] \quad (3)$$

其中  $[M]$  是质量矩阵,  $[M_p]$  是附加质量矩阵, 并且  $[M_p]$ , 可以通过使用如下的 Westergatd 公式来模拟:

$$[M_p] = \frac{7}{8} \rho A \sqrt{hy} \quad (4)$$

其中  $\rho$  为水体的密度,  $A$  为该点对应的坝表面积,  $y$  为任意水深。

结构的自由振动方程可从有限元动力平衡方程中求出, 具体如下:

$$([K] - \omega^2 [\bar{M}]) \{\delta_0\} = 0 \quad (5)$$

本文的重力坝抗滑稳定分析模型采用二维建模, 采用平面问题的求解方法。在重力坝受到其自重、水压力、以及扬压力的作用下, 其变形状况以及应变变化情况。

### 3. 重力坝抗滑稳定的有限元分析

#### 3.1. 模型建立

研究重力坝深层抗滑稳定性问题是非常困难的, 由于坝基岩体具有不连续的特点, 坝基内部裂隙、断层等结构面的切割组合关系、分布特点、产状等非常复杂, 以及坝基内部存在结构面组合, 尤其是缓倾角断层对大坝的安全性、稳定性的影响; 再加上坝基长期经受地质作用, 通常会存在裂隙、节理以及风化等问题, 有时还存在软弱夹层、破碎带以及断层; 导致重力坝深层抗滑稳定性难以满足。因此需要做好坝基基础处理, 提高坝体的整体性、强度以及防渗性能等[12], 本文的重力坝抗滑稳定分析模型采用二维建模, 采用平面问题的求解方法。在重力坝受到其自重、水压力、以及扬压力的作用下, 其变形状况以及应变变化情况。

坝体高 30 m, 设计洪水 30 m, 校核洪水 25 m, 左侧的倾斜角度为 1:0.2, 右侧倾斜角度为 1:0.75。坝体宽度 5 m, 混凝土的杨氏模量为  $2 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比为 0.167, 其大坝自重为  $2.4 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>, 水的密度为 103 Kg/m<sup>3</sup>, 建立模型如图 1 所示。

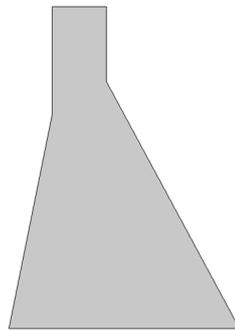
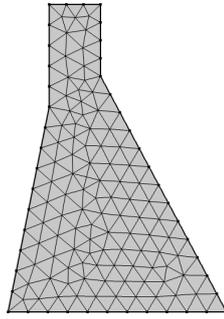


Figure 1. Establishment of concrete gravity dam model

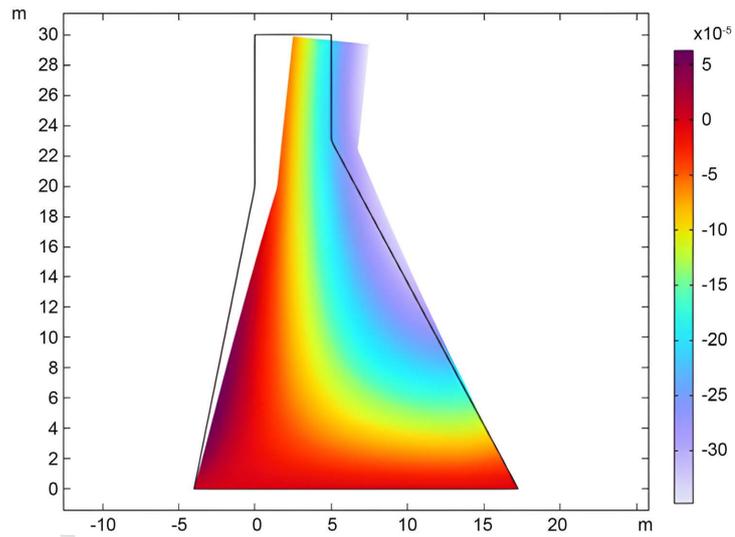
图 1. 混凝土重力坝模型建立

#### 3.2. 有限元模型及网格划分

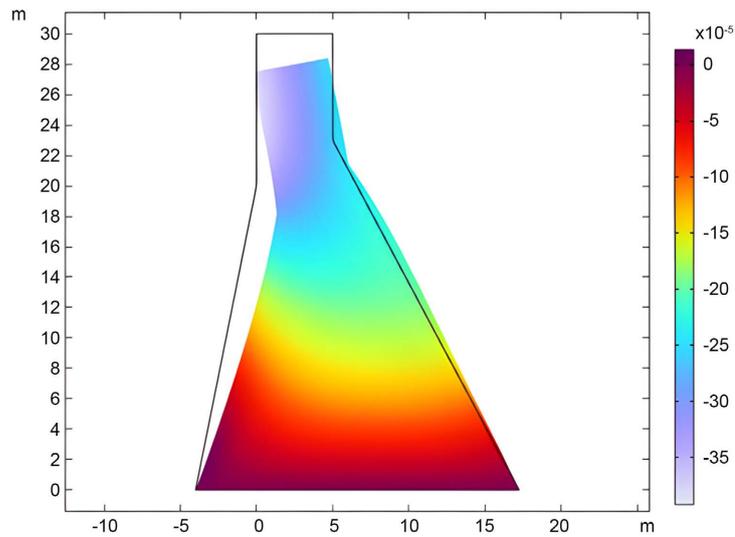
本试验采用平面应变有限单元法对混凝土重力坝的抗滑稳定进行研究, 已建立大致的相互影响度。采用自动生成网格, 计算结果准确、精度高。由于计算机储存功能较大和计算量要求较高, 在利用 comsol 软件操作中采用比较多的三角网格和一些节点数的个数。在计算过程中以及解决平面问题的时候, 本文采用三角形网格划分进行模拟分析, 如图 2 所示。



**Figure 2.** Finite element mesh of concrete gravity dam  
**图 2.** 混凝土重力坝的有限元网格



(a) x 方向



(b) y 方向

**Figure 3.** Stress cloud diagram of concrete gravity dam  
**图 3.** 混凝土重力坝位移云图

### 3.3. 计算结果及分析

图 3(a)为坝体在正常蓄水位静力作用下的水平方向和垂直方向位移云图。由图 3 可知, 在正常蓄水位作用下, 坝体的垂直应力基本为压缩应力, 左侧坝底周围仅出现拉应力区, 最大拉应力值不超过 C15 混凝土静力抗拉强度(0.91 MPa), 符合安全要求。图 3(b)为坝体在正常蓄水位静力作用下的垂直方向位移云图。从图中可以看出, 在正常蓄水位的作用下, 坝段和斜坡的踵折角等几何变化处出现拉应力集中, 下游坝的折角, 尤其大坝左侧坝底与水压结合面以及基岩结合面处的受力是最大的。导致重力坝发生滑移变形。因此, 建议对此处进行加固处理。

### 4. 结论

采用有限元分析软件 COMSOL 对重力坝抗滑稳定应变变化进行有限元分析, 得出以下结论:

- 1) 重力坝在一定的水位作用下, 其变形和强度均满足要求, 能够保证正常蓄水状况下的稳定。
- 2) 重力坝的左侧坝底, 尤其大坝左侧坝底与水压结合面以及基岩结合面处位移和应力达到最大值, 导致重力坝发生滑移变形, 因此建议在重力坝设计和施工中对此处进行重点关注与控制。
- 3) 只考虑坝基面的抗滑稳定性这与有限元法得到的结论基本一致, 即坝体抗滑稳定薄弱点在坝基面处的坝趾处。有限元法可以考虑多种因素的作用, 对坝体的抗滑稳定性分析更为全面。大坝失稳破坏是坝基面的上下游破坏区向中上部扩展直至完全屈服贯通的渐进过程, 坝基岩体的破坏较少。

### 参考文献

- [1] 陈远强, 郑宏, 陈涛. 基于数值流形法重力坝抗滑稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 133-137.
- [2] 严克兵, 杨翔, 朱代富, 等. 翁结水库碾压混凝土重力坝动力特性及其抗滑稳定分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 35-41.
- [3] Guo, L.N., Li, T.C., Lu, S.S. and Guo, Y.J. (2011) Deep Sliding Stability Analysis of Gravity Dam Based on FEM Strength Reduction. *Advanced Materials Research*, **243**, 4608-4613. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.243-249.4608>
- [4] Chen, Y., Zhang, L., Yang, G., Dong, J. and Chen, J. (2012) Anti-Sliding Stability of a Gravity Dam on Complicated Foundation with Multiple Structural Planes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **55**, 151-156. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.010>
- [5] 孙建生. 基于有限元应力载荷宏观刚性滑裂面极限平衡抗滑稳定计算理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 862-875.
- [6] 刘银勇, 林潮宁, 刘晓青, 等. 基于有限元重力坝抗滑稳定静动力可靠度快速求解方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 8-13.
- [7] Yue, J., Shen, Z., Xu, L. and Zhang, K. (2022) Numerical Analysis the Calcium Leaching Effect in Concrete and Concrete-Rock Interface on Concrete Gravity Dam Anti-Sliding Stability. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01158. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01158>
- [8] 张彦文. 和尚沟水电站大坝抗滑稳定性分析[J]. 水科学与工程技术, 2019(4): 60-62.
- [9] 韩光伟. 重力坝深层抗滑稳定性分析与基础处理方法探讨[J]. 低碳世界, 2019, 9(2): 94-95.
- [10] 温中华, 周娟, 熊秋晓. 重力坝抗滑稳定分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 112-113.
- [11] Xu, G., Guo, B., Meng, Z. and Zhao, J. (2022) Seismic Safety Review of Gravity Dam Based on Finite Element Method. *Geofluids*, **2022**, Article ID: 5463613. <https://doi.org/10.1155/2022/5463613>
- [12] 张耀屹, 徐缙青, 周亮. 基于 ANSYS 的重力坝稳定性有限元分析[J]. 中国水运, 2011, 11(3): 142-143.