

尾矿库坝体稳定性评价中简化 Bishop 法与瑞典条分法的安全系数差异研究——以盐边县某尾矿库为例

马京京

四川建筑职业技术学院

DOI:10.12238/jsse.v3i3.14950

[摘要] 尾矿库坝体的稳定性是矿山安全生产和环境保护的关键因素。文章以攀枝花市盐边县某尾矿库为研究对象,采用简化Bishop法和瑞典圆弧条分法对其坝体稳定性进行了详细分析。通过对比两种方法的计算原理、适用条件及实际工程中的应用效果,揭示了它们在尾矿库坝体稳定性评估中的差异。研究表明,简化Bishop法在考虑土条间侧向力作用时,能够提供更高的计算精度,适用于复杂坝体结构的稳定性分析;而瑞典圆弧条分法则因其计算过程简单,适用于初步设计阶段的快速评估。本研究为尾矿库坝体稳定性分析提供了科学依据,并为工程实践中选择合适的分析方法提供了参考建议。

[关键词] 尾矿库; 安全系数; 简化Bishop法; 瑞典条分法

中图分类号: V215.1 文献标识码: A

Comparative Study on Safety Factor Differences Between Simplified Bishop Method and Swedish Slice Method in Tailings Dam Stability Evaluation — A Case Study of a Tailings Pond in Yanbian County

Jingjing Ma

Sichuan College of Architectural Technology

[Abstract] The stability of tailings dams is a key factor in ensuring mine safety and environmental protection. This paper takes a tailings pond in Yanbian County, Panzhihua City as a case study to conduct a detailed analysis of dam stability using the Simplified Bishop Method and the Swedish Circular Arc Slice Method. By comparing the calculation principles, applicable conditions, and practical engineering performance of the two methods, the study reveals their differences in evaluating tailings dam stability. The results show that the Simplified Bishop Method, which accounts for inter-slice forces, provides higher calculation accuracy and is more suitable for analyzing complex dam structures. On the other hand, the Swedish Slice Method, due to its simple calculation process, is more appropriate for preliminary design and rapid assessment. This study provides a scientific basis for tailings dam stability analysis and offers practical recommendations for selecting appropriate analysis methods in engineering practice.

[Key words] Tailings dam; safety factor; Simplified Bishop Method; Swedish Slice Method

引言

尾矿库是矿山企业重要的安全设施,其坝体稳定性直接关系到下游地区的环境安全和人民生命财产安全^[1]。据统计,我国尾矿库事故中,坝体失稳占比超过60%,其中因稳定性评价方法选择不当导致的误判是重要原因之一^[2];目前,极限平衡法仍是尾矿库坝体稳定性评价的主流方法,其中瑞典条分法和简化Bishop法应用最为广泛。瑞典条分法作为最早提出的圆弧滑动法,因其计算简便,在工程实践中长期占据主导地位;而简化

Bishop法通过考虑土条间相互作用力,被认为能提供更精确的结果^[3]。然而,两种方法在理论假设和计算精度上的差异,可能导致对同一工程问题的不同结论。

目前,圆弧滑动法是尾矿坝稳定性分析的主流方法,其中瑞典条分法和简化Bishop法因原理清晰、计算简便被广泛应用。然而,两种方法对条块间作用力的处理差异可能导致计算结果显著不同,甚至影响工程安全决策。文章以攀枝花市盐边县某尾矿库为研究对象,通过对比两种方法的计算结果,揭示其理

论差异与工程适用性,为类似工程稳定性评价方法选择提供参考。

1 稳定性分析的必要性

尾矿库坝体的稳定性计算具有极其重要的意义,具体体现在以下几个方面:

(1) 保障安全生产:尾矿库是矿山生产过程中的重要组成部分,储存着选矿过程中产生的大量尾矿。一旦坝体发生失稳,不仅会中断矿山的正常生产活动,还可能导致严重的人员伤亡和设备损失。通过稳定性计算,可以提前识别潜在的风险点,采取必要的加固措施,确保矿山的持续安全运营。

(2) 环境保护:尾矿中往往含有重金属和其他有害物质,若坝体不稳定导致尾矿泄漏,会对周边环境造成严重污染,影响土壤、水源及生态系统健康。稳定性计算有助于评估坝体的安全性,预防此类环境灾难的发生。

(3) 符合法规要求:根据尾矿库设计相关规范,对二等库及其以上级别的尾矿库,必须进行严格的稳定验算,并满足不同工况下的最小安全系数要求,这不仅是法律规定的强制性要求,也是衡量工程设计是否合规的重要指标。

(4) 优化设计与施工方案:通过详细的稳定性计算,能够全面了解坝体在各种工况下的表现,从而为坝体的设计提供科学依据。例如,在确定坝体坡度、选择筑坝材料以及制定排水系统时,都可以基于计算结果做出更为合理的选择,进而提升整个项目的经济效益和社会效益。

(5) 应对自然灾害和突发事件:考虑到地震等自然灾害的影响,特别是在地震基本烈度为8度区的情况下,设计基本地震加速度值达到0.20g,必须对尾矿库进行地震条件下的稳定性分析。这有助于提高坝体抵御自然灾害的能力,减少因不可抗力因素造成的损害风险。

2 简化Bishop法与瑞典圆弧条分法的理论对比

2.1 基本假定与计算原理

瑞典圆弧条分法假设滑动面为圆弧形,且忽略土条间的相互作用力,仅满足整体力矩平衡条件。其安全系数定义为抗滑力矩与滑动力矩之比,公式如(1)。

$$K = \frac{\sum(Cl + W\cos\theta \cdot \tan\phi)}{\sum W\sin\theta} \quad (1)$$

式中K—整个滑体剩余下滑力计算的安全系数; l—单个土条的滑动面长度(m),W—条块重力(kN),浸润线以上取重度,以下取饱和重度; θ —条块的重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角(度); C, ϕ —土的抗剪强度指标,采用总应力法时,取总应力指标,采用有效应力法时,取有效应力指标。

简化Bishop法在瑞典法基础上,考虑了土条间的法向作用力,假设条间力水平,并通过迭代计算满足整体力矩平衡和竖向力平衡条件。其安全系数表达式为公式(2)。

$$K = \frac{\sum(Cb + Wtg\phi) \frac{1}{m_\theta}}{\sum W\sin\theta} \quad (2)$$

$$m_\theta = \cos\theta + \frac{\sin\theta \cdot \tan\phi}{K}$$

2.2 计算精度与适用性

瑞典法因忽略条间力,计算结果通常偏低10%~20%,误差随滑动面圆心角和孔隙压力的增大而增大^[2]。而简化Bishop法通过考虑条间法向力,计算结果更接近真实值,尤其适用于软弱土层或高孔隙水压力条件下的稳定性分析^[3]。

2.3 工程应用中的优缺点

瑞典圆弧条分法具有计算简便和地层适应性较强的优势,但忽略条间力导致安全系数系统性偏低,且无法精确模拟地震荷载下的条间力动态变化;简化Bishop法通过迭代计算显著提升精度(有效量化孔隙水压力与地震力),更贴近实际工况,但依赖计算机软件实现,且对复杂滑动面形态的适应性稍弱。二者选择需权衡计算效率与精度需求,对高渗透性尾矿坝应优先采用Bishop法。

3 小水井尾矿库工程实例分析

3.1 工程概况

该尾矿库属于山谷型尾矿库,设计总库容为684.7万立方米,有效库容479.3万立方米,设计总坝高189米,按总坝高和总库容判定为三等库,但考虑到下游250米处有高速公路通过,故提升为二等库进行设防。初期坝采用透水型混合材料坝,后期堆积坝使用上游法尾矿筑坝,坝顶标高1410米,坝高63.70米,顶宽6.56米,下游坡比为1:2.5,上游坡平均坡比为1:1.75。为了确保坝体稳定性,本次勘察采用了简化Bishop法进行稳定计算,根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863-2013),对正常运行、洪水运行及特殊运行条件下的坝坡稳定进行了分析,并确定了相应的安全系数要求,稳定计算剖面的平面布置图如图1。

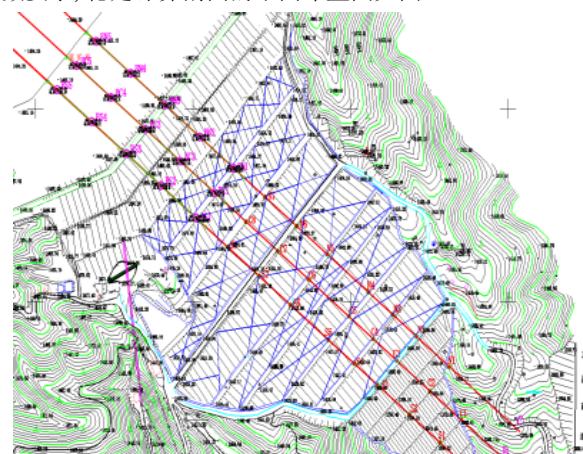


图1 稳定计算剖面的平面布置图

3.2 计算剖面与参数确定

选择2-2'剖面(如图2所示)为计算对象,该剖面位于坝体中心,地层分布和荷载条件具有代表性。计算参数取自室内试验和现场测试结果(计算参数见表1),计算工况包括正常运行(正常水位+坝体自重);洪水运行(最高洪水位+坝体自重);特殊运行:最高洪水位+坝体自重+地震力(8度设防)。

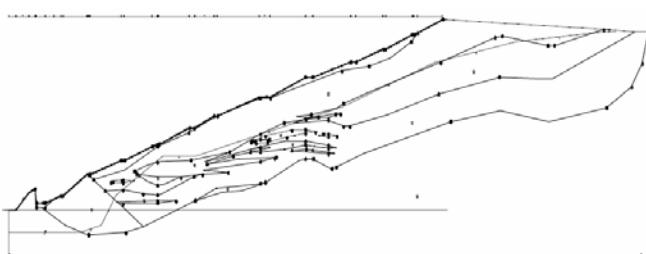


图2 2-2' 剖面计算模型

表1 稳定性计算参数表

指标 地层	天然重 度 ρ	饱和重 度 ρ_{sat}	抗剪强度(总应力法)			
			水上		水下	
	(kN/m³)	(kN/m³)	黏聚力 C (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	黏聚力 C (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)
素填土	18	19	24	14	15	10
初期坝	22.0	22.5	19	29	17	28
尾粉砂	21	22	8	25	7	23
尾粉土	22	22.4	20	24	19	22
尾粉质黏土	20	20.2	25	17	20	16
残坡积含碎石粉质黏土	19.5	19.8	28	16	20	13
强风化辉长片麻岩	24.0	24.2	60	35	60	35

3.3 计算结果对比与分析

采用理正岩土7.0边坡稳定分析模块进行计算,结果对比分析如下:

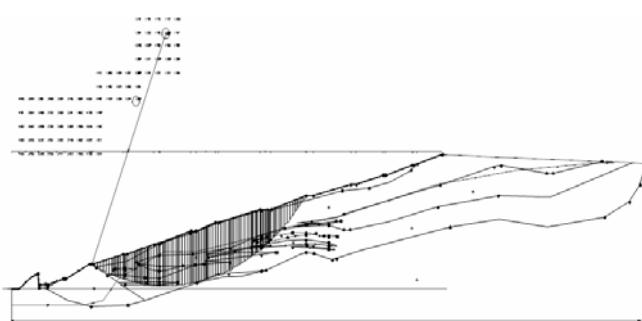


图3 2-2' 剖面地震工况稳定性计算简图

正常运行工况: 瑞典法安全系数为1.303, 规范最小值为1.25, 安全系数大于规范最小值; 简化Bishop法安全系数为1.467, 规范最小值为1.35, 同样安全系数大于规范最小值。且简化Bishop法计算结果比瑞典法计算结果更大, 说明在正常运行工况下, 两种方法均判定坝体稳定, 且简化Bishop法计算的安全裕度相对更高。

洪水运行工况: 瑞典法安全系数为1.102, 规范最小值为

1.15, 安全系数小于规范最小值; 简化Bishop法安全系数为1.304, 规范最小值为1.25, 安全系数大于规范最小值。这表明两种方法对洪水运行工况下坝体稳定性的判定存在差异, 瑞典法判定为不稳定, 而简化Bishop法判定为稳定。

特殊运行工况: 瑞典法安全系数为0.997, 规范最小值为1.05, 安全系数小于规范最小值; 简化Bishop法安全系数为1.197, 规范最小值为1.15, 安全系数大于规范最小值。与洪水运行工况类似, 两种方法对地震运行工况下坝体稳定性的判定结果不一致, 瑞典法判定不稳定, 简化Bishop法判定稳定。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 方法差异: 简化Bishop法因考虑条间力, 计算结果通常高于瑞典法, 尤其在软弱土层或高孔隙水压力条件下差异显著。

(2) 2-2' 剖面稳定性: 简化Bishop法计算结果表明, 坝体在三种工况下均满足规范要求, 判定为稳定; 而瑞典法在洪水和地震运行工况下判定为不稳定, 形成矛盾结论。

(3) 方法选择建议: 对于重要尾矿库或地质条件复杂的坝体, 推荐采用简化Bishop法进行稳定性评价; 对于初步评估或对稳定性要求不高的场合, 可采用瑞典法进行快速估算。

4.2 建议

(1) 加强数据监测: 在尾矿库运行过程中, 应加强对浸润线、孔隙水压力和位移的监测, 为稳定性分析提供实时数据支持。

(2) 完善计算模型: 针对尾矿库的多层土体结构, 建议采用数值模拟方法(如有限元法)进一步验证极限平衡法的计算结果。

(3) 强化安全管理: 根据计算结果, 对2-2' 剖面所在坝段采取加固措施(如增设排水棱体、压坡平台), 提高坝体在极端工况下的安全性。

参考文献

[1] 门永生,柴建设.我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J].中国安全生产科学技术,2009,5(01):48-52.

[2] 陈祖煜.土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

[3] 郑凤英.边坡稳定分析方法及其工程应用[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2017,29(02):189-193.

作者简介:

马京京(1995--)男,汉族,甘肃庆阳市人,硕士研究生,毕业于西南科技大学,现任四川建筑职业技术学院助教,研究方向: 工程管理、岩土工程。