

水利工程中缓倾角结构面对坝基抗滑稳定的影响研究

李刚

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7059

[摘要] 缓倾角结构面会显著削弱坝基岩体的力学性能,是影响坝基深层抗滑稳定的关键控制因素。本文以水利工程中典型混凝土重力坝为研究对象,针对缓倾角结构面的几何与力学特征,重点分析其在坝基内的分布组合对滑动模式及抗滑机制的影响。基于刚体极限平衡理论与有限元强度折减法,建立概化数值模型,系统探讨结构面倾角、连通率及抗剪强度参数对坝基整体安全系数的影响规律。

[关键词] 水利工程; 缓倾角结构面; 坝基抗滑稳定; 强度折减法; 安全系数; 软弱夹层

中图分类号: TV5 **文献标识码:** A

Research on the Influence of Gently Inclined Structural Planes on the Anti-Sliding Stability of Dam Foundation in Hydraulic Engineering

Gang Li

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] The presence of gently inclined structural planes significantly weakens the mechanical properties of the dam foundation rock mass and constitutes a controlling factor for the deep anti-sliding stability of the dam foundation. Taking a typical concrete gravity dam in hydraulic engineering as the object, this paper focuses on the geometric and mechanical characteristics of gently inclined structural planes and analyzes the influence of their distribution and combination within the dam foundation on the sliding mode and anti-sliding mechanism. Based on the rigid body limit equilibrium theory and the finite element strength reduction method, a generalized numerical model is established to systematically study the influence of the inclination angle, connectivity rate, and shear strength parameters of the structural planes on the overall safety factor of the dam foundation.

[Key words] hydraulic engineering; gently inclined structural plane; anti-sliding stability of dam foundation; strength reduction method; safety factor; weak interlayer

1 引言

坝基抗滑稳定是重力坝与拱坝设计中涉及工程安全的根本性问题。坝基岩体作为天然地质体,受构造运动及风化卸荷作用,内部常发育大量尺度不一的软弱结构面。其中,缓倾角结构面由于产状平缓、延展性较强,极易与陡倾裂隙或下游临空面组合,形成潜在滑移通道,从而成为制约坝基深层抗滑稳定的关键因素。多起坝基失稳案例表明,缓倾角软弱夹层、剪切带或成组裂隙是诱发滑动的主要地质界面。此类结构面通常充填泥质、碎屑或蚀变矿物,力学强度远低于母岩,在库水推力和渗透压力联合作用下,易率先发生屈服并逐步扩展贯通,最终导致坝基沿复合滑面整体失稳。因此,深入认识缓倾角结构面对坝基抗滑稳定的影响机制及影响程度,是坝基工程地质评价与加固设计的核心内容。基于此,本文拟从水利工程坝基抗滑稳定的通用力学问题出发,借助概化数值模型,系统研究缓倾角结构面倾角、连通率和抗剪强度参数三因素对坝基稳定性的影响规律。

2 缓倾角结构面基本特征与力学特性

2.1 地质成因与几何特征。缓倾角结构面是坝基岩体中一类重要的不连续面,倾角一般不超过 30° ,常见于层状沉积岩层理、变质岩片理、岩浆岩原生节理及各类构造剪切带中。其产状多受区域构造应力场控制,在河谷卸荷松弛区域,原有陡倾裂隙可随岩体蠕滑发生错动,转化为雁列式缓倾裂隙。几何参数上,缓倾角结构面的延展长度可从数米延续至数十米甚至上百米,张开度约数毫米至数厘米,充填物性质多变,包含泥膜、糜棱岩、方解石脉或绿泥石薄膜。结构面并非完全连续,连通率是描述其连续性的一项重要指标,定义为沿某方向结构面迹长之和与测线总长之比。连通率增大意味着结构面提供的可滑移面积比例增高,阻滑段岩桥效应减弱。

2.2 剪切强度准则。缓倾角结构面的抗剪特性是决定坝基抗滑能力的关键。描述其峰值强度广泛采用莫尔-库仑线性准则:

$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan \varphi_p$$

式中, τ_p 为峰值抗剪强度 (MPa), σ_n 为法向应力 (MPa), c_p 为视黏聚力 (MPa), ϕ_p 为峰值内摩擦角 ($^\circ$)。

对于充填软弱物质的缓倾角夹层, 黏聚力和内摩擦角常很低, c_p 多处于 0.02~0.15 MPa, ϕ_p 约 $12^\circ \sim 25^\circ$, 远低于硬性结构面。当剪切位移超过峰值后, 强度会跌落至残余值 c_r 、 ϕ_r 。坝基在长期荷载下渐进破坏时, 残余强度参数更加重要。此外, 对于较粗糙的无充填缓倾裂隙, Barton 提出的 JRC-JCS 模型亦常被采用, 通过节理粗糙度系数 JRC 和壁岩单轴抗压强度 JCS 表征起伏对抗剪能力的贡献。其表达式为:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right]$$

其中 ϕ_b 为基本摩擦角。该模型能较好反映低法向应力下粗糙度对剪切强度的影响, 但在含软弱充填物的夹层中适应性不佳。坝基抗滑分析中仍以莫尔-库仑准则为主。

2.3 渗透与变形特性。缓倾角结构面充填物透水性具有非均质各向异性。充填碎屑或泥质时透水性较弱, 可形成相对隔水层, 利于坝基下集聚渗透压力; 而当夹泥被水流侵蚀掏空后, 又可形成集中渗漏通道。裂隙渗透水流施加的拖曳力和扬压力会显著削弱有效法向应力, 降低结构面的抗剪强度储备。变形方面, 缓倾角结构面在法向应力下呈非线性闭合, 切向则表现为塑性屈服和剪胀。坝基在正常蓄水及汛期水位变动中反复加卸载, 软弱夹层的变形模量小、蠕变趋势显著, 可能引发时效变形和应力转移, 累积损伤滑移面的抗剪能力。

3 坝基抗滑稳定的分析理论

3.1 刚体极限平衡法。坝基深层抗滑稳定经典分析中, 刚体极限平衡法应用最广。其基本思路是假定坝体与部分基岩作为刚体, 沿特定滑裂面达到极限平衡状态, 通过抗力与下滑力的比值计算安全系数。对含缓倾角结构面的复合滑动模式, 常考虑上游拉裂面(陡倾)、底滑面(缓倾角结构面)及下游剪出口或切层段的组合。典型的双滑面计算模式中, 设缓倾角底滑面 AB 倾角为 α , 下游阻滑段 BC 视倾角为 β 或切割岩体, 安全系数 K 可表达为:

$$K = \frac{\sum (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum T_i}$$

其中, c_i 、 φ_i 为各段抗剪参数, l_i 为段长, N_i 和 T_i 为相应滑面的法向力与切向滑动力。对于缓倾角底滑面, 下滑力分量 $T = W \sin \alpha + P \cos \alpha$, 抗滑力为 $c l + (W \cos \alpha - P \sin \alpha - U) \tan \varphi$, 此处 P 为库水推力水平分量, U 为作用在滑面上的扬压力。可见, 倾角 α 越低, 下滑力越小, 但法向有效应力也较高, 有利抗滑; α 增大到一定程度, 下滑力显著上升, 可能削弱稳定裕度。刚体极限平衡法概念清晰、计算简便, 但无法考虑岩体变形协调和渐进破坏过程。对于缓倾结构面塑性区扩展、应力重分布等现象, 需借助数值方法。

3.2 有限元强度折减法。强度折减法已成为评价坝基稳定性的一种有效数值途径。其思想是不断折减岩体和结构面的抗剪强度参数, 直至计算不收敛或特征点位移发生突变, 将此临界状态对应的折减系数定义为整体安全系数。折减方式为:

$$c_F = \frac{c}{F}, \varphi_F = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{F} \right)$$

F 为强度折减系数。通过在模型中同时折减完整岩石和结构面参数, 可自动搜索最危险滑裂面, 避免预先假定滑动形状带来的偏差。

针对含缓倾角结构面坝基, 有限元模型能详尽反映结构面的展布、连通状况和非线性剪切行为, 尤其能捕获坝踵拉应力区、缓倾夹层剪切屈服区和下游岩体挤压破碎区的演化。该方法已被相关研究和规范采纳, 本文后续数值影响分析即以强度折减法为基础工具。

4 缓倾角结构面对坝基抗滑稳定的影响

缓倾角结构面并不孤立作用, 它通过多种力学途径降低坝基整体稳定性。

(1) 构成底滑面的几何条件。当坝基内存在贯通或半贯通的缓倾结构面且倾向下游时, 天然具备了形成底滑面的几何基础。此时只需在坝踵附近拉裂或沿下游阻滑段岩桥剪断, 即可形成完整的复合滑移通道。若缓倾结构面连续延伸至坝趾下游, 可直接形成单滑面滑动机构, 稳定性极低。(2) 应力集中与剪切屈服。有限元分析表明, 在坝体自重和库水推力作用下, 缓倾角结构面的尖端和与陡倾结构面的交切部位会产生显著的应力集中。软弱夹层由于模量较低, 将吸引剪切变形集中, 使塑性区沿结构面方向发展。一旦屈服区相互连通, 形成贯穿性剪切带, 抗滑力便由峰值跌落至残余状态, 推动坝基失稳临界逼近。(3) 扬压力效应。缓倾结构面若导水性好, 库水可直接渗透到滑面, 形成较大扬压力。扬压力抵消了部分有效法向应力, 显著降低结构面的抗剪能力。如底滑面法向总应力为 σ_n , 孔隙水压力为 u , 则有效抗剪强度为 $c + (\sigma_n - u) \tan \varphi$ 。水位骤升或排水失效时, u 急剧增大, 可瞬时引发滑动风险。(4) 渐进破坏与岩桥断裂。缓倾结构面通常并不是完全贯通, 剩余岩桥承担着巨大的剪应力。随加载或参数劣化, 岩桥部分逐渐产生微裂隙并扩展断裂, 结构面连通率等效提高, 抗剪面积减少, 导致应力转移至未破坏部位, 形成连锁破坏。这种渐进式破坏模式使得坝基在接近宏观失稳前, 变形加速, 呈现明显的位移突变前兆。(5) 倾角效应的双面性。倾角的影响并非单调。倾角过小 ($< 10^\circ$), 下滑力虽小, 但滑面过于平缓, 正常荷载组合下安全系数较高。倾角增大, 下滑力分量增大, 安全系数下降。但倾角进一步增大到超过某个界限时, 滑移方向与坝基主应力方向协调性变差, 下游阻滑段所需提供的抗力降低, 甚至可能转变为以峭断岩体为主的切层破坏, 安全系数又有所回升。因此, 理论上存在最不利倾角范围, 后续章节将进行定量揭示。

5 缓倾角结构面影响因素的数值模拟分析

为定量厘清缓倾角结构面倾角、连通率及抗剪参数对坝基安全系数的影响规律, 本节开展概化数值试验。

5.1 计算模型与参数。选取典型非溢流混凝土重力坝断面, 坝高 100 m, 坝顶宽 10 m, 坝底宽 75 m, 上游面垂直, 下游坝坡

1:0.75。坝基计算域范围向上、下游各延伸2倍坝高,深度方向取2倍坝高。岩体视为弹塑性材料,满足Mohr-Coulomb屈服准则,混凝土坝体采用线弹性模型。

坝基内预设一条主导缓倾角结构面,距建基面15~20 m深处,延展方向倾向下游。基准参数:结构面倾角 α 变化范围 $5^\circ \sim 30^\circ$,连通率 λ 取100%、90%、75%和60%四级,抗剪峰值黏聚力 $c=0.10$ MPa,内摩擦角 $\phi=20^\circ$,未连通段按较完整岩体参数赋值。基岩物理力学参数:密度 2650 kg/m^3 ,弹性模量 20 GPa ,泊松比 0.25 ,黏聚力 1.2 MPa ,内摩擦角 45° ,抗拉强度 0.8 MPa 。坝体混凝土密度 2400 kg/m^3 ,弹性模量 28 GPa ,泊松比 0.167 。

荷载工况采用正常蓄水位加自重,上游水头 95 m ,下游水头 10 m 。考虑坝基面及结构面的扬压力作用,按规范线性折减分布。计算采用有限元强度折减法,以特征点位移拐点结合迭代收敛敛作为失稳判据,获得整体安全系数 K 。

5.2倾角对安全系数的影响。保持连通率为100%、结构面强度为基准值时,改变倾角 α 由 5° 至 30° ,所得安全系数如表1所示。

表1 不同结构面倾角下的坝基安全系数

倾角($^\circ$)	5	10	15	20	25	30
安全系数 K	3.45	2.98	2.45	2.51	2.80	3.22

从表1可见,安全系数随倾角先减小后增大, $\alpha=15^\circ$ 时最低为2.45,较 5° 时下降29%。 20° 时稳定系数略有回升, $25^\circ \sim 30^\circ$ 持续上升。这一规律缘于下滑力分量随倾角增大而增大,同时阻滑段岩体受力机制发生了转变。当倾角超过约 18° 后,滑动路径趋向于切穿下游抗力体,导致基岩的贡献比例上升,安全系数止跌反升。由此确认 $15^\circ \sim 20^\circ$ 为最不利倾角区间,设计中应重点校核该倾角范围的结构面。

5.3连通率的影响。锁定结构面倾角 15° 这一最不利状态,改变连通率。连通率取60%时,安全系数为3.87,相比贯通时($\lambda=100\%$, $K=2.45$)提高了58%。当连通率从60%增至75%,安全系数轻微下降至3.52;连通率达到90%时,安全系数骤降至2.78;完全贯通后进一步降至2.45。下降呈现非线性加速特征,表明连通率超过75%后岩桥效应急剧减弱,结构面趋向整体滑移通道。水利工程地质勘察中,应特别关注坝基下缓倾角结构面连通率的准确探测,若其值已达75%以上,必须采取加固措施(如抗剪洞、深齿槽)补强。

5.4抗剪强度参数的影响。仍取倾角 15° 、连通率100%的设置,分别调整黏聚力 c 与内摩擦角 ϕ 。当 ϕ 固定为 20° , c 值从 0.05 MPa 增至 0.15 MPa ,安全系数从2.21近似线性升至2.68;当 c 固定为 0.10 MPa , ϕ 由 16° 增至 24° ,安全系数由2.23升至2.67。关系近乎线性,近似每增大 1° ϕ 安全系数增大0.11,黏聚力每增大 0.01 MPa 安全系数增大0.047。这说明缓倾角结构面强度参数的小幅劣化可导致稳定性的成比例损失。在坝基长期运行中,渗透溶蚀、泥化夹层含水量增加及蠕变损伤均会弱化 c , ϕ 。因此,依据室内及现场试验慎取强度指标,并适当引入长期折减系数,是保守设计不可或缺的步骤。

5.5综合影响讨论。由数值分析可知,缓倾角结构面通过倾角、连通率、强度参数三重路径影响坝基安全系数。最不利倾角区间的出现提示设计人员不能仅凭直觉认为“越平缓越危险”或“越陡越危险”,必须结合实际产状精细建模;连通率揭示了岩桥作为最后的“锁固段”具有的储备价值,加固设计可着眼于减小有效连通率;而强度参数敏感性的线性特点简化了参数取值的安全裕度设定,可在可靠度分析中直接导入敏感系数。需要强调的是,实际坝基中常发育多组缓倾角夹层或裂隙,彼此在空间上交汇切割,形成的楔形体或阶梯状滑面比单一平面更为复杂,此时需借助三维块体理论或三维有限元分析,不宜简单套用本文单结构面模型的结果。但本文揭示的基本力学规律——非单调倾角效应、连通率加速弱化效应及强度参数线性敏感效应——在更复杂工况下依然具有参考意义。

6 结论

本文以缓倾角结构面为研究对象,通过理论分析与数值模拟相结合的手段,系统研究了其对水利工程坝基抗滑稳定的影响,得到如下主要结论:

(1)缓倾角结构面构成坝基深层滑动的主滑面,其倾角对安全系数的影响非单调。在概化条件下,最不利倾角位于 $15^\circ \sim 20^\circ$ 区间,此范围内下滑力与阻滑能力失衡最为突出,坝基安全系数降至最低值。(2)结构面的连通率是控制稳定性的关键几何参数。连通率低于75%时岩桥效应显著,安全系数较高且下降缓慢;连通率超过75%后,抗剪储备加速丧失,完全贯通时安全系数下降幅度可达58%以上。(3)缓倾角软弱带的黏聚力与内摩擦角对坝基整体稳定的影响近乎线性,参数每折减单位量,安全系数按恒定比例降低。这为考虑参数变异的可靠度分析提供了便捷的敏感度依据。(4)坝基设计中应充分依据勘测资料查明缓倾角结构的展布、连通状态和物理力学指标,优先针对连通率大于75%且倾角在 15° 左右的区段采取加固措施,包括设置抗剪传力结构、加强排水降低扬压力等。

本文结论基于均质基岩内单一缓倾结构面的概化假定,未来需进一步探讨多组结构面交互切割、非均匀地应力场及地震荷载等复杂条件下的影响规律,并发展三维非线性渐进破坏分析方法,以更全面服务于高坝大库的长期安全运行。

【参考文献】

- [1]钱龙,王刚,李梦瑶,等.重力坝坝基多斜面抗滑稳定模糊体系可靠度研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):117-122.
- [2]王任飞.基于水利水电工程岩质边坡抗滑稳定性分析[J].黑龙江水利科技,2020,48(1):95-97.
- [3]王凯,李同春,程井.基于分区有限元与块体界面元混合算法的重力坝深层抗滑稳定分析[J].中国农村水利水电,2020(5):98-102.

作者简介:

李刚(1985—),男,汉族,河南通许人,大学本科,高级工程师,主要从事水利水电工程地质勘察工作。