

高混凝土重力坝深层抗滑稳定分析及结构优化设计研究

王思宇

河北省水建水电工程有限公司, 河北 保定 071000

[摘要]高混凝土重力坝作为水利工程中的核心挡水建筑物,其深层的抗滑稳定性对整个水利工程安全稳定运行以及综合效益有着直接的影响。文章围绕高混凝土重力坝工程的实际情况对其深层抗滑稳定性的内在机制、主要影响因素进行深入分析,在此基础上,提出兼顾工程经济性、抗滑安全的结构优化方案。研究表明,影响高混凝土重力坝深层抗滑稳定性的三大核心因素主要有抗剪强度、渗透扬压力以及自重分布。而文章提出的优化策略能够保障大体生成抗滑安全,控制工程建设成本,以供参考。

[关键词]高混凝土重力坝; 深层抗滑稳定; 数值模拟; 结构优化; 软弱结构面

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19601

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

Research on Deep Anti-skid Stability Analysis and Structural Optimization Design of High Concrete Gravity Dam

WANG Siyu

Hebei Shuijian Hydropower Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: As the core water retaining structure in hydraulic engineering, the deep anti sliding stability of high concrete gravity dams has a direct impact on the safe and stable operation and comprehensive benefits of the entire hydraulic engineering. The article conducts an in-depth analysis of the internal mechanism and main influencing factors of the deep anti-skid stability of high concrete gravity dam engineering based on its actual situation. On this basis, a structural optimization plan that balances engineering economy and anti-skid safety is proposed. Research has shown that the three core factors affecting the deep anti-skid stability of high concrete gravity dams are mainly shear strength, seepage uplift pressure, and self weight distribution. The optimization strategy proposed in the article can ensure overall anti-skid safety and control engineering construction costs for reference.

Keywords: high concrete gravity dam; deep anti-skid stability; numerical simulation; structural optimization; weak structural plane

引言

高混凝土重力坝因其耐久性好、承载能力强、施工便捷等显著优势广泛应用于大型水利枢纽工程建设中。但是,随着坝体高度的不断增加,坝基所承受的竖向荷载以及水平推力也随之增大,在一定程度上导致坝体深层抗滑稳定性的问题日益凸显。制约了高混凝土重力坝的可持续、高质量发展。更为关键的是,多数高混凝土重力坝存在裂缝、夹层等质地缺陷,降低坝基岩体的抗剪性能,甚至会引发深层滑动失稳安全事故,后果极为严重。基于此,本文对高混凝土重力坝深层抗滑稳定进行相关研究,对坝体生成滑动的内在机制进行明确,在此基础上提出针对性的结构优化措施,以此实现坝体抗滑安全与工程经济的统一。

1 高混凝土重力坝深层抗滑稳定受力机制与影响因素

1.1 深层抗滑稳定受力机制

高混凝土重力坝深层抗滑稳定的核心目标是抵御坝体沿坝基深层潜在滑动面产生的滑动趋势,同时这也是保障大坝长期安全稳定运行的关键。高混凝土重力坝的受力体系主要包括自身重力、渗透扬压力、上游水压力以及地基反力等,且各作用力共同决定了坝体的抗滑稳定。坝体自重则通过与地基接触面的摩擦力、凝聚力形成抵御滑动的核心力量,上游水压力会持续产生推动坝体沿潜在滑动面滑动的水平作用力,地基反力会对坝体形成反向支撑,渗透扬压力会向上作用于坝体底部,抵消部分坝体自重,进而对坝体稳定带来不利影响。坝体沿潜在滑动面的总滑

动力大于总抗滑力,坝体及地基的变形量超过极限允许值均会引起深层滑动的发生。值得注意的是,坝基深成的软弱结构区域岩体强度较低,因此,在受到外界因素的影响下,极易发生深层滑动。

1.2 深层抗滑稳定主要影响因素

影响高混凝土重力坝深层抗滑稳定的核心因素主要包括地质、荷载、设计三大类,地质因素是基础前提,荷载因素是直接驱动力,设计因素则是调控保障。

地质因素对高混凝土重力坝深层抗滑稳定性能的影响具有根本性,软弱结构面的抗剪强度对坝基的抗滑承载力有着直接的影响,抗剪强度越低,坝体面的抗滑承载力也就越弱,水质也提高了失稳风险;软弱结构面的渗透性也会影响混凝土重力坝深层抗滑稳定,渗透性越强,坝基的渗水情况就越严重,渗透压的压力也随之增大,从而降低抗滑力。地基岩体的完整性、弹性模量等关键参数也会对坝体与坝基的变形协调性有着直接的影响,变形协调不足会导致坝体局部应力集中,从而对削弱坝体的抗滑稳定性能起到间接作用。

荷载因素直接决定滑动面的受力状态,上游水压力大小与坝高、蓄水位正相关,坝高越高,蓄水位越高,水平推力越大,滑动风险越高;坝基渗水形成的扬压力会抵消部分坝体自重,降低有效抗滑力,扬压力的大小与坝基防渗措施、渗水路径存在一定相关性;坝体自重越大,滑动面的正压力越大,摩擦力越强,但过度增加自重会导致工程成本上升。

设计因素通过优化坝体结构、完善防护措施,对坝体的受力分布以及抗滑能力有着直接的影响。如因不合理的坝体体型设计会导致部分区域抗滑能力不足、受力不均,长期运行下容易导致整体失稳。设计过程中未实施科学有效的构造强化措施,无法形成稳定、可靠的抗滑体系,未能充分发挥出坝体与地基的协同抗滑作用。

2 高混凝土重力坝深层抗滑稳定分析方法

2.1 刚体极限平衡法

将坝体与滑动体视为刚体,不考虑材料的变形特性;潜在滑动面为已知的深层软弱结构面,滑动面的抗剪强度符合库仑抗剪强度准则;坝体受力处于极限平衡状态,满

足力的平衡与力矩平衡条件。针对深层单一滑动面,采用抗滑稳定安全系数 K 作为评价指标,即滑动面上的总抗滑力与总滑动力的比值。根据规范要求,高混凝土重力坝深层抗滑稳定安全系数 K 需满足:正常工况 $K \geq 1.05$,特殊工况(地震、校核洪水) $K \geq 1.0$ 。

2.2 有限元法

2.2.1 模型建立

采用三维有限元软件建立坝体-地基耦合模型,模型范围包括坝体、坝基及周边一定范围的岩体,以确保计算精度。坝体混凝土采用线弹性模型,地基岩体采用弹塑性模型,深层软弱结构面采用接触面单元,模拟其剪切变形特性;荷载边界条件包括坝体自重、上游水压力、下游水压力、渗透扬压力及地基约束,其中渗透扬压力通过设置孔隙水压力场模拟。

2.2.2 计算内容与评价指标

有限元法重点分析深层滑动面的剪应力、法向应力及相对位移,评价指标包括:①滑动面剪应力:若剪应力超过滑动面的抗剪强度,表明滑动面存在滑动趋势;②坝体应力:坝体最大拉应力需控制在混凝土允许拉应力范围内,避免坝体开裂;③滑动面相对位移:若相对位移超过允许值,表明坝体存在失稳风险。

2.3 两种方法对比分析

对比刚体极限平衡法与有限元法的计算特点、适用场景及优缺点,结果如表 1 所示。两种方法结合使用,可确保评价结果的准确性。

3 高混凝土重力坝结构优化设计

结构优化设计以“安全优先、经济合理、技术可行”为原则,结合深层抗滑稳定影响因素及分析结果,针对坝体体型、防渗排水系统及构造措施三个核心环节,提出协同优化方案,在保证深层抗滑稳定安全系数满足规范要求的前提下,降低工程成本,提升结构综合性能。

3.1 优化目标与约束条件

建立多目标优化函数,兼顾抗滑稳定性与经济性。首要目标:深层抗滑稳定安全系数 $K \geq$ 规范要求(正常工况 ≥ 1.05 ,特殊工况 ≥ 1.0);次要目标:降低坝体混凝土用量,减少工程投资,目标函数为混凝土用量最小化;辅

表 1 刚体极限平衡法与有限元法的计算特点、适用场景及优缺点对比

分析方法	计算特点	适用场景	优点	缺点
刚体极限平衡法	忽略变形,基于力的平衡计算安全系数	初步设计阶段,快速评估	计算简便、概念清晰、效率高	未考虑变形协调,精度较低
有限元法	考虑材料非线性与变形协调,模拟应力位移分布	详细设计阶段,精准验证	精度高、能反映真实受力状态	计算复杂、对参数要求高、效率低

助目标：优化坝体应力分布，避免坝体开裂，提升结构耐久性。

根据规范要求及工程实际，深层抗滑稳定安全系数 K 满足规范限值；坝体最大拉应力 \leq 混凝土允许拉应力，最大压应力 \leq 混凝土允许压应力；坝顶高程、坝底宽度、上游坝面坡度等参数符合设计规范；优化方案需适配常规施工工艺，确保施工可行性。

3.2 具体优化方案

3.2.1 坝体体型优化

坝体体型优化设计应该重点关注上游坝面坡度、坝底宽度及坝踵形状三大核心指标，同时也应该避免渗透扬压力过大，以免对坝体深层抗滑稳定性造成影响。

在优化坝体体型的基础上，同时需要对防渗排水系统进行针对性的优化处理。在上游坝面坡度的设计过程中优化为变坡设计，下部 1/3 坝高采用 1:0.7~1:0.9 的缓坡，增强坝体抗滑稳定性；上部 2/3 坝高采用 1:0.2~1:0.4 的陡坡；在坝底宽度优化上，基于深层抗滑稳定安全系数计算结果，在满足 $K \geq 1.05$ 的前提下，合理减小坝底宽度，摒弃过度保守的设计模式。在坝踵优化环节，在坝踵设置齿槽，深度为坝高的 1/10~1/8，使其嵌入地基完整岩体，有效增加坝体与地基的咬合作用，提升抗滑承载力。

3.2.2 防渗排水系统优化

针对渗透扬压力过大这一影响坝体稳定的突出问题，优化方案重点从防参与排水两方面发力：在防渗帷幕优化上，将防渗帷幕前移至坝踵上游，同时加深帷幕深度，确保其穿透深层软弱结构面，彻底阻断渗水路径，且采用高压灌浆工艺，大幅提升帷幕防渗性能；在坝底防渗优化上，采用沥青杉木板与止水铜片双重防渗体系，在坝底铺设防渗层，有效遏制坝底渗水现象；在排水系统优化上，在坝基设置深层排水洞与排水孔，其中排水孔采用梅花形布置，间距控制在 2~3m、孔径为 100~150mm，通过科学布置排水设施，有效降低坝基孔隙水压力，将扬压力系数严格控制在 0.2~0.3 范围内，全面保障坝体长期安全稳定运行。

3.2.3 构造措施优化

为了提高坝体整体的抗滑稳定性能，通过针对性地增设抗滑构造、地基处理、优化结构等相关措施，以此强化坝体与地基之间的协同抗滑作用。在坝底设置纵向抗滑键，将其嵌入深层完整岩体，在布设的过程中采用 1.5m × 2.0m 的截面尺寸并按 5~8m 间距布设，以此来增强坝体的抗滑能力。虽然坝体混凝土具备了一定的承载力，但是在坝踵、坝趾等应力集中区域等应力集中的部位容易发生开裂的风险，基于此，应该加强对坝体配筋的优化处理，

通过在关键区域增设表层钢筋网以此来提高混凝土的抗裂性能，在一定程度上可以避免因裂缝扩展而影响整体的抗滑稳定性。同时，坝基软弱结构面通常是抗滑较为薄弱的区域，单纯依靠结构构造未能从根本上解决深层的滑移问题。基于此，为了能够实现坝体与地基协同受力、共同抵抗滑移的目的，通过对坝基深层软弱结构面掺入高强度灌浆材料，可以有效提高岩体力学的性能，对坝基深层软弱结构面实施灌浆加固处理能够有效提升摩擦系数以及凝聚力。

4 优化方案数值验证

采用有限元法对优化前后的坝体深层抗滑稳定性能进行对比验证，沿用 3.2 节建立的坝体-地基耦合有限元模型，优化前后模型的材料参数、荷载条件保持一致，仅改变坝体体型、防渗排水系统及构造措施；滑动面抗剪强度参数优化后为 $f=0.85$ ， $c=0.55\text{MPa}$ ，扬压力系数优化后为 0.25；混凝土允许拉应力为 1.5MPa，允许压应力为 15MPa。三种工况下，优化前后深层抗滑稳定安全系数、混凝土用量及最大应力对比结果如表 2 所示。

表 2 优化前后的三种工况下坝体深层抗滑稳定性能对比

工况类型	评价指标	优化前	优化后	变化率
正常蓄水	安全系数 K	1.08	1.25	+15.7%
	混凝土用量 (万 m^3)	120	105	-12.5%
	最大拉应力 (MPa)	1.45	1.20	-17.2%
设计洪水	安全系数 K	1.05	1.20	+14.3%
	混凝土用量 (万 m^3)	120	105	-12.5%
	最大拉应力 (MPa)	1.52	1.25	-17.8%
地震	安全系数 K	1.02	1.15	+12.7%
	混凝土用量 (万 m^3)	120	105	-12.5%
	最大拉应力 (MPa)	1.60	1.30	-18.7%

由表 2 中可以看出，经过优化后，三种工况下的深层抗滑稳定安全系数呈现出提升趋势，其中正常蓄水土况安全系数提升 15.7%，可以有效避免因水位渗流波动作用而造成抗滑性能的减弱；地震工况提升 12.7%，说明进一步提高了工程的抗震水平，可以有效避免因地震引发坝基失稳的情况；坝体混凝土用量减少 12.5%，说明优化后的方案能够实现绿色施工以及经济节约的双重目标；坝体最大拉应力严格控制在混凝土允许拉应力范围内，且较优化前降低 17% 以上，由此可以看出优化方案能够有效缓解应力集中的问题，不仅可以避免混凝土裂缝发生的隐患，而

且可以降低后期运维成本。表明优化方案有效提升了深层抗滑稳定性能,破解此前存在的安全隐患,延长坝体的使用寿命,实现了安全与经济的协同统一。

5 结论与展望

5.1 结论

高混凝土重力坝深层抗滑稳定对大坝的安全运行寿命,以及工程整体可靠性有着直接的影响,坝基深层软弱结构面的抗剪强度特性、渗透扬压力及坝体自重分布是影响其深层抗滑稳定的核心因素,其中尤为关键的是软弱结构面的摩擦系数与黏聚力两大指标对安全系数的影响最为敏感,是评估大坝深层抗滑稳定性的核心依据。在实际工程评估的过程中,为了能够更加精准、全面地反映大坝深层抗滑稳定的状态,采用“刚体极限平衡法+有限元法”的组合分析方法,可切实提升评价结果的准确性。针对常规设计所存在的不足,通过优化坝体结构,提高坝基软弱结构面抗剪性能等优化方案能够确保大坝深层抗滑稳定安全系数符合规范要求,而且有助于减少混凝土的用量,降低工程成本,同时优化坝体应力分布,避免因局部应力集中而导致结构损伤,实现安全与经济的协同统一。

5.2 展望

本文研究未考虑极端地质条件对深层抗滑稳定的影响,后续可进一步结合人工智能算法,提升优化效率与精

度,为大坝长期运行维护提供技术支撑。考虑材料非线性与地质不确定性,引入可靠度分析方法,提升深层抗滑稳定评价的科学性。

[参考文献]

- [1]余侃柱.川中红层地区混凝土重力坝建基面选择研究[J].人民长江,2020,51(11):146-152.
- [2]常雪,蔡宗磊.重力坝基岩深层多滑模型渗透压影响研究与数值分析[J].东北水利水电,2023,41(1):40-44.
- [3]李建波,常雪,刘苏日.基岩深层多滑面抗滑稳定求解方法对比分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(3):22-27.
- [4]钱龙,王刚,李梦瑶,李向鹏.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.
- [5]杨锦,尚高增,陈海坤,等.高悬臂厂坝导墙单侧挡水工况下的抗滑稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):82-87.
- [6]黄畅.近水平软弱夹层坝基高重力坝深层抗滑稳定和基础处理措施研究[J].水利水电技术,2019,50(11):250-255.
- [7]刘烁楠,肖伟,邹德兵.龙塘水库大坝深层抗滑稳定研究[J].水电与新能源,2024,38(10):10-14.

作者简介:王思宇(1996—),毕业于长春工程学院水利水电工程专业,现就职于河北省水建水电工程有限公司,助理工程师。