高拱坝水利水电工程抗震性能分析与加固措施

刘丹

江西硕越建筑工程有限公司，江西 瑞金 342500

摘要：本文聚焦高拱坝水利水电工程抗震性能分析与加固措施展开研究。深入剖析高拱坝在地震作用下的动力响应特性及可能出现的抗震薄弱环节，结合实际工程案例，探讨影响高拱坝抗震性能的关键因素。通过分析不同加固措施的原理与适用性，提出针对性的加固方案，旨在提升高拱坝水利水电工程的抗震能力，保障工程在地震等极端情况下的安全稳定运行，为高拱坝工程的抗震设计与加固提供理论支持和实践参考。通过本文的研究，不仅加深了对高拱坝水利水电工程抗震性能的理解，也为提升高拱坝工程的抗震能力提供了有效的加固方案和实践参考，对于保障工程在地震等极端情况下的安全稳定运行具有重要意义。

关键词：高拱坝；水利水电工程；抗震性能分析；加固措施；动力响应

高拱坝作为水利水电工程中重要的挡水建筑物，具有结构复杂、受力条件苛刻等特点。在地震作用下，高拱坝将承受巨大的地震惯性力，其抗震性能直接关系到工程的安全运行和下游人民生命财产的安全。随着我国水利水电事业的快速发展，高拱坝工程的建设规模不断增大，所处地质环境也日益复杂，地震灾害对高拱坝的威胁愈发凸显。因此，深入研究高拱坝水利水电工程的抗震性能，分析其可能存在的抗震问题，并提出科学有效的加固措施，具有重要的现实意义和工程应用价值。

一、高拱坝水利水电工程抗震性能分析基础

（一）高拱坝结构特点与地震作用下的受力机制

高拱坝通常具有较大的坝高和较薄的坝体，其体型呈拱形，能够将水压力等荷载通过拱的作用传递至两岸山体。在地震作用下，高拱坝的受力机制变得极为复杂。地震波会引起坝体和地基的振动，使坝体产生惯性力，同时还会导致坝体与地基之间的相互作用发生变化。坝体在地震力作用下会发生弯曲、剪切和扭转等多种变形，这些变形相互耦合，进一步

加剧了坝体的受力状态。例如，在地震过程中，坝体上游面会受到水压力和地震惯性力的共同作用，产生较大的拉应力，而下游面则可能因地震波的反射和折射出现应力集中现象，这些受力特点使得高拱坝在地震作用下容易发生破坏^[1]。

（二）地震动特性对高拱坝抗震性能的影响

地震动特性是影响高拱坝抗震性能的关键因素之一^[2]。地震动的频率、幅值、持续时间等参数会直接影响高拱坝的动力响应。当地震动的频率与高拱坝的自振频率接近时，会发生共振现象，导致坝体的振动幅度急剧增大，从而增加坝体破坏的风险。地震动的幅值越大，坝体所承受的地震惯性力也就越大，对坝体的强度和稳定性要求越高^[3]。此外，地震动的持续时间也会影响高拱坝的损伤程度，长时间的振动会使坝体材料产生疲劳损伤，降低坝体的抗震能力。例如，在一些强震区，高拱坝可能会受到多次余震的持续作用，导致坝体裂缝不断发展，最终影响工程的安全运行^[4]。

（三）高拱坝抗震性能分析的常用方法与局限性

目前,高拱坝抗震性能分析常用的方法包括拟静力法、反应谱法和动力时程分析法等。拟静力法将地震作用简化为一个等效的静力荷载作用于坝体上,计算简单,但忽略了地震动的动力特性和坝体的动力响应,分析结果较为粗略。反应谱法考虑了地震动的频率特性,通过反应谱曲线来计算坝体的地震响应,但该方法只能得到结构的最大响应,无法反映地震过程中结构响应的时程变化。动力时程分析法能够直接输入地震波记录,计算坝体在地震过程中的动力响应,具有较高的精度,但计算过程复杂,需要大量的计算资源和时间,且对地震波的选取具有较大的主观性。这些方法各有优缺点,在实际应用中需要根据工程的具体情况和要求进行选择,但都存在一定的局限性,难以全面准确地评估高拱坝的抗震性能^[5]。

二、高拱坝水利水电工程抗震薄弱环节识别与成因

(一) 坝体裂缝问题及其成因分析

坝体裂缝是高拱坝在地震作用下常见的抗震薄弱环节之一。在地震过程中,坝体受到复杂的应力作用,当拉应力超过坝体材料的抗拉强度时,就会产生裂缝。坝体裂缝的产生不仅会降低坝体的整体强度和稳定性,还会为水的渗透提供通道,进一步加剧坝体的破坏。坝体裂缝的成因主要包括设计方面、施工方面和材料方面。设计时对地震作用的考虑不足,坝体体型设计不合理,导致局部应力集中;施工过程中混凝土浇筑质量不佳,存在养护不当等问题,使混凝土内部产生微裂缝;坝体材料性能不稳定,如混凝土强度不均匀、抗拉性能差等,也会增加坝体裂缝产生的风险。

(二) 坝肩稳定问题及影响因素探讨

坝肩稳定是高拱坝抗震安全的关键。高拱坝将大部分荷载传递给两岸山体,坝肩岩体的稳定性直接影响坝体的安全。在地震作用下,坝肩岩体可能会发生松动、滑移甚至失稳破坏。

影响坝肩稳定的因素众多,地质条件是首要因素,如岩体的完整性、节理裂隙发育程度、软弱夹层的存在等都会降低坝肩岩体的抗剪强度。地震力的作用会使坝肩岩体受到额外的动力荷载,加剧岩体的变形和破坏。此外,水库蓄水后,水对坝肩岩体的渗流作用会降低岩体的有效应力,增加岩体的滑动风险。例如,在一些地质条件复杂的地区,坝肩岩体可能存在多组节理裂隙,地震作用下这些裂隙可能会进一步扩展,导致坝肩失稳。

(三) 地基处理不当引发的抗震隐患

地基处理是高拱坝工程的重要环节,处理不当会引发严重的抗震隐患。地基的承载能力不足会导致坝体在地震作用下产生过大的沉降和不均匀变形,影响坝体的正常使用和抗震性能。地基的抗震性能差,如地基土的液化、软土地基的变形等,会使坝体失去稳定的基础。在工程建设过程中,如果对地基的地质情况勘察不准确,未能及时发现和处理地基中的不良地质现象,或者地基处理方案不合理,如地基加固深度不够、加固方法不当等,都会使地基在地震作用下无法有效承受坝体传递的荷载,从而引发坝体破坏。例如,在一些软土地基上建设的高拱坝,由于地基处理不到位,地震时地基土发生液化,导致坝体倾斜甚至倒塌。

(四) 泄洪设施抗震性能不足的潜在风险

泄洪设施是高拱坝工程的重要组成部分,其抗震性能不足会带来潜在的风险。在地震作用下,泄洪设施可能会受到破坏,导致泄洪能力下降,无法及时排泄洪水,从而引发洪水漫坝等严重后果。泄洪设施的抗震性能问题主要体现在结构强度不足、连接部位松动等方面。结构设计时对地震作用的考虑不够全面,未充分考虑地震力对泄洪设施各部件的影响,导致结构在地震作用下出现裂缝、变形甚至破坏。泄洪设施与坝体的连接部位如果处理不当,在地震时容易产生松动,影响泄洪设施的正常运

行。例如，某高拱坝在地震中，泄洪洞的进口段因地震力作用出现裂缝，导致泄洪能力降低，险些引发洪水灾害。

三、高拱坝水利水电工程加固措施研究与实践

（一）坝体裂缝加固技术与实施要点

针对坝体裂缝问题，可综合运用多种加固技术。灌浆加固作为常用且行之有效的方法，其原理是借助专业设备将水泥浆、化学浆液等特定材料精准注入裂缝内部。水泥浆成本较低、来源广泛，能填充较大裂缝并起到初步加固作用；化学浆液则具有较好的流动性和粘结性，可深入微小裂缝，填充效果更佳。实施灌浆加固时，精确确定裂缝位置、走向和宽度是关键。可采用无损检测技术如超声波检测、红外热成像等，避免对坝体造成二次损伤。选择灌浆材料需综合考虑裂缝特性、坝体材料及环境因素，如潮湿环境下应选用抗水性好的浆液。灌浆压力的确定需依据裂缝深度、宽度及坝体强度，压力过小无法有效填充，过大则可能使裂缝扩展。预应力锚固技术通过在坝体表面或内部合理布置锚索，施加预应力来改善坝体应力状态。设计锚索布置方式要结合坝体受力分析，使锚索能均匀分散应力；锚固长度需保证锚索与坝体充分结合，提供足够锚固力；张拉力要精确计算，避免过大导致坝体局部破坏或过小无法达到加固效果。

（二）坝肩稳定加固策略与工程应用

为提高坝肩稳定性，需综合采用多种加固策略。锚固加固是常用且重要的手段，在坝肩岩体中合理设置锚杆、锚索等锚固构件，将坝肩岩体与稳定基岩紧密连接。锚杆适用于浅层岩体加固，通过注浆使其与岩体结合，提高岩体抗剪强度；锚索则适用于深层岩体，能提供更大锚固力。确定锚固构件布置间距、长度和锚固角度时，要充分考虑坝肩岩体的地质条件，如岩体节理裂隙发育程度、岩性等，以及受力

情况，包括地震力、水压力等作用。布置间距过大会导致加固效果不连续，过小则增加成本且施工困难；长度需保证锚固端进入稳定岩体足够深度；锚固角度要使锚固构件能充分发挥抗剪作用。支挡加固中，挡土墙和抗滑桩是常用结构。挡土墙能有效阻挡坝肩岩体滑移，设计时要充分考虑地震力影响，通过力学计算确定其尺寸、配筋等，确保其具有足够的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性。抗滑桩则通过桩身与岩体的相互作用，提供抗滑力，其桩径、桩长和间距需根据滑移体规模和岩体特性确定。排水措施通过设置排水孔、排水沟等降低坝肩岩体孔隙水压力，提高岩体稳定性。

（三）地基加固方法及效果评估

针对地基处理不当引发的抗震隐患，有多种地基加固方法可供选择。强夯法适用于处理砂土、粉土等地基，通过重锤自由下落对地基进行强力夯实。在强夯施工前，需对地基进行勘察，确定地基土的物理力学性质，合理选择夯锤重量、落距和夯击次数。夯锤重量和落距的组合要保证能产生足够的夯击能，使地基土得到充分压实；夯击次数则根据地基土的密实度要求确定。振冲法利用振冲器的振动和水冲作用，在地基中形成桩体，与原地基土共同组成复合地基。施工时要控制振冲器的振动力、水压力和填料量，确保桩体质量。振动力要能使周围土体充分液化，水压力要保证填料顺利进入孔内，填料量要满足桩体设计要求。水泥搅拌桩法通过特制的深层搅拌机械，将水泥与地基土强制搅拌，形成具有一定强度和整体性的水泥土桩。搅拌过程中要严格控制水泥掺入比、搅拌速度和提升速度，水泥掺入比直接影响桩体强度，搅拌速度和提升速度要保证水泥与地基土充分混合。实施地基加固后，效果评估至关重要。现场载荷试验可直接测定地基的承载能力，通过在加固后的地基上施加荷载，观察地基的变形情况，确定其承载力是否满足设计要求。

（四）泄洪设施抗震加固方案与实践经验

为提高泄洪设施的抗震性能，需制定科学合理的加固方案。对泄洪设施结构进行加强是基础，增加钢筋配置可提高结构的抗拉、抗压强度，钢筋的规格、间距和布置方式要根据结构受力特点精心设计，如在关键受力部位增加钢筋数量或采用高强度钢筋。采用高强度混凝土能提升结构的整体刚度和耐久性，施工时要严格控制混凝土配合比、浇筑质量和养护条件，确保混凝土达到设计强度。对泄洪设施与坝体的连接部位进行加固处理，连接部位是地震时易损坏的薄弱环节。采用高强度连接件，如高强螺栓、预应力锚栓等，并选择可靠的连接方式，如焊接、螺栓连接结合等，确保连接部位在地震作用下能承受巨大拉力和剪力而不松动。在泄洪设施的关键部位设置减震装置，如橡胶支座、阻尼器等。橡胶支座具有良好的弹性和变形能力，能吸收和缓冲地震能量；阻尼器则可通过自身的阻尼特性耗散地震能量，降低地震对泄洪设施的破坏作用。在实际工程中，某高拱坝对泄洪洞进行抗震加固时，通过增加

洞身钢筋提高洞身强度，在洞身与坝体连接处设置橡胶支座，有效减小地震时连接部位的应力集中。在后续地震中，该泄洪洞未受到明显破坏，仍能正常泄洪，保障了工程的正常运行。

结束语

高拱坝水利水电工程抗震性能分析与加固措施研究是一项复杂而重要的工作。通过对高拱坝抗震性能的深入分析，识别出坝体裂缝、坝肩稳定、地基处理不当和泄洪设施抗震性能不足等抗震薄弱环节，并探讨了其成因。针对这些问题，提出了坝体裂缝加固技术、坝肩稳定加固策略、地基加固方法和泄洪设施抗震加固方案等有效的加固措施。在实际工程中，应根据高拱坝的具体情况和抗震要求，合理选择和应用这些加固措施，并进行科学的效果评估。未来，随着地震工程学和水利水电工程技术的不断发展，应进一步加强对高拱坝抗震性能的研究，不断完善加固措施，提高高拱坝水利水电工程的抗震能力，为我国水利水电事业的安全发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 杨钊. 水利工程设计中结构与地基加固技术的应用分析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023(9): 21-23
- [2] 李四红. 水利水电工程灌浆施工技术与管理措施分析[J]. 湖南水利水电, 2022(1): 31-33.
- [3] 谢玲丽, 陈梦影. 水利枢纽坝体结构设计参数及边坡变形规律分析[J]. 陕西水利, 2025, (04): 162-165.
- [4] 姚玮. 水利水电工程中的大坝加固技术研究 [J]. 水上安全, 2025, (03): 53-55.
- [5] 邹丽春, 侯顺载, 杨宜文. 高拱坝地震应力控制标准和抗震工程措施研究[J]. 水力发电, 2001, 27(8): 54-56