

高烈度地震区地下水工洞室群抗震韧性评估及加固技术

杨杉杉

青矩工程顾问有限公司西藏分公司，西藏拉萨，850000；

摘要：地下水资源属于战略性资源，在能源供给、城乡供水保证以及生态系统维持等重要方面起着不可替代的作用。随着我国水利基础设施建设的不断推进，在地震高烈度区建成了许多水工洞室群工程并投入使用。此类工程一般都存在深度大、地质情况复杂、结构形式多样的特点，在强震作用下很容易受到严重的破坏甚至完全丧失功能，给人员的生命安全、财产的保护以及生态环境的可持续发展带来了极大的危险。因此，急需对高烈度地震区地下水工洞室群的抗震韧性展开系统评价，探究其在极端地震荷载影响下出现的损伤机理及破坏状况，进而给出相应的加强措施来改善整个抗灾效能并保证长久的使用可靠。目前国内外有关地下结构抗震性能的研究成果十分丰富，但是对复杂地质环境影响下的大规模洞室群综合评定方法及个性化优化方案还存在着明显的不足。

关键词：高烈度地震区；水工洞室群；抗震韧性评估；加固技术

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.052

引言

地震是自然灾害的一种重要表现形式，它由于具有很强的破坏作用，给人们的生命财产安全和基础设施稳定性造成了很大的危害。高烈度地震频发区，经常出现的强烈震动给各种建筑结构、工程设施的抗震性能提出很高的要求。作为水利系统的重要组成部分，地下洞室群在水资源调配、输水通道建设、水电能源开发等工作中起着不可替代的作用，并且具有防洪抗灾的功能。其运行状况直接影响到整个水利工程安全可靠程度和防灾减灾能力。由于地下洞室群大多处在地质状况繁杂、充满不确定性且存在断裂带附近或者高地应力分布的环境下，而且因为岩石属性存在较大差别等诸多因素的制约，在设计时会遇到诸多难题。同时这种结构具有多样化的特征，有交叉式的布局、超大的跨度以及边坡的特征等很多种形态组合方式。这些特点造成它在遭受强震的时候有特别的力学响应规律和可能的失效方式。传统的抗震设计思想只重视单个构件的强度、刚度分析，不能对洞室群全生命周期动态演化趋势及从初始状态到最终失稳阶段转变的过程做出准确的预测。在此情况下，对高烈度地震条件下地下洞室群体系进行系统的抗震韧性研究，并采用经济可行的技术手段提高其抗风险能力，已经成为目前水利工程建设领域急需解决的重要问题之一。

1 地下水工洞室群抗震韧性提升的重要性

从国家战略角度来讲，地下水工洞室群属于水资源

优化配置、清洁能源开发和防洪体系创建的关键基础设施载体，它的抗震性能同区域乃至全国水安全保障整体效能存在直接联系。高地震烈度频发区的关键洞室群一旦受到强震的破坏，就会造成供水中断、电力供应中断等一系列连锁反应，不但会扰乱工业生产和居民生活秩序，还会引起水库大坝失稳等次生灾害，给社会稳定和发展带来严重威胁。在这种情况下，提高这类基础设施抗震能力不但是保证极端自然灾害中核心水利设施安全运行的战略选择，也是区域可持续发展的重要基础。在实际的工程建设中，由于很多工程处于地质构造复杂、地震活动频繁的地区，地下空间开挖存在着诸多的技术难题以及高昂的建设成本。加强抗震设计可以有效地降低地震引发的结构损伤概率，也可以大幅度地减少运营期间由于功能丧失造成的经济损失，进而达到资源高效利用和长期稳定运行的目的。对已经投入使用但是设计标准较低的老项目进行科学的抗震水平评价，并实施有针对性的加固改造，可以弥补历史规划中存在的不足，保证其能适应未来复杂多变的自然环境变化，给长期可靠服务提供技术支持。

2 地下水工洞室群加固技术优化原则

2.1 以地质条件适应性为核心

地震高烈度区地质构造特征一般具有很强的复杂性，有断层破碎带、软弱夹层、高地应力区和岩性不均这些特殊的地质元素。根据以上区域的洞室群建设项目，加固设计方案要依靠详细的地质勘查资料来开展系统

的分析和综合评价。应当对不良地质体的空间分布范围、尺寸大小以及物理力学性质进行准确的探查,还要对它在强震作用下产生的动力响应规律进行探究。对于含断层破碎带的场地应采取注浆加锚固的方法提高结构的抗剪能力,并配合混凝土衬砌工艺来提高对软弱岩体的支撑能力;对于高应力区则要特别注意防范岩爆这类危险,把分步开挖、柔性支护的思想融入到施工计划当中去,防止刚性支撑造成应力聚集的问题。只有使加固措施准确地适应具体的地质条件,才能使工程的安全水平和长期运行效果得到提高。

2.2 以结构功能完整性为目标

地下水工洞室群是多单元集成的复杂工程系统,是由功能不同的各个功能模块组成,并通过内部通道实现有机整合。任何一个单元或者连接部位出现结构缺陷,都会对整个系统安全运行造成较大影响。根据上述特点,本文提出了一种系统的加固设计思路,其主要思想就是加强各个独立洞室的抗震能力,同时重视过渡区(进出口、交叉口、弯道、拐角等)、关键节点、附属设施等容易受到损害的地方的技术改进和提高。对于交叉区段,由于其特有的应力集中效应,在地震时容易造成裂缝的扩展或者局部失稳等问题,因此需要提高衬砌的承载能力、采用钢支撑或者使用高强度的新材料来提高承载能力。对核心设备基础要进行细致的动力学模拟分析,根据实际情况配装必要的减振装置,保证关键设备在极端条件下可靠工作。对地下水工洞室群及重要部位开展全方位的安全性评定和技术革新工作之后,既可有效削减自然灾害的危害程度,又能保证整个系统得以长久稳定地运作,防止因为局部出现故障而引发一系列的灾害事故。

2.3 以全生命周期经济性为考量

在高烈度地震区地下水工程洞室群加固项目中,由于资金投入量大,优化加固设计方案时要全面考虑短期建设成本和长期运维费用的关系,做全生命周期经济性分析。方案比选过程中要考虑到材料采购、施工安装等直接的经济支出,也要考虑到加固后的洞室群未来运营期间发生的维修保养费用、抗震减灾带来的间接效益、结构使用寿命延长所带来的附加价值。一些创新型加固技术、新型材料虽然初期投入大,但是由于具有很好的耐久性、简化了以后的管理程序或者大大提高了抗震性

能等优点,在综合评价中有可能表现出更高的经济回报潜力。必须警惕过度加固造成的资源浪费问题,在严格遵守抗震规范的基础上,依靠精细化的设计和高效的施工工艺,寻找技术创新和成本控制之间的最佳平衡点,达成技术先进性和经济可行性的统一,给科学决策赋予可靠的依据,并且改善工程项目综合效益。

3 基于抗震韧性提升的加固技术优化方案

3.1 基于地质体-结构体系协同作用的抗震加固技术

高烈度地震区的地下水工程洞室群抗震性能研究要兼顾结构自身力学特性和地质体稳定性,还要探究两者之间的协同作用机理。关键技术就是充分发挥围岩自身的承重能力,用科学的加固方法把地质介质变成与人工构筑物互相作用的有机整体,从而抵御地震载荷的作用。具体的技术路线如下,首先对可能受地震影响的区域做系统的地质力学参数测试和地应力场反演分析,得到洞室周边岩石的物理力学性质、初始应力分布特征和地震响应行为;在此基础上按照“主动强化加被动防护”的思想来制订施工方案,在具备较好完整性且具有一定强度的围岩地段,采用锚杆(索)支护、喷射混凝土等方式开展主动加固工作,提升材料弹性模量和塑性表现,进而削减地震引发的破坏风险;对于存在软弱破碎等地质缺陷的区域,利用注浆工艺改良岩体品质,联合钢拱架等辅助设施创建双重安全保障体系,明显加强整个抗灾能力及可靠程度。

3.2 基于功能韧性提升的多级减震与能量耗散加固技术

研究洞室群在地震作用下功能保持和快速恢复的关键技术,利用多级减振体系和能量耗散装置来抑制地震波传播、减小结构损伤,保证核心功能的稳定。研究包含以下步骤,用数值模拟技术对洞室群各个功能单元和关键节点进行地震响应分析,重点放在大型设备基础、交叉口和高边墙底部等容易损坏的区域上,给出承载能力评价结果以及潜在的失效风险点;对高风险部位采取多层次防护措施,一级减震使用柔性隔离材料(橡胶隔震垫)放在洞室主体和围岩界面或者机械设备和支撑平台之间,利用它的非线性特性吸收外界震动能量,二级减震就是把衬砌内部或者连接处有塑性变形特性的耗能元件(金属屈服型装置)植入进去,在动态加载过程

中使能量有序地释放并转化。以水电站地下厂房为例,水轮机基座与楼板交接处设置铅芯橡胶支座,可以改善振动抑制效果;在高边坡洞室下段加装摩擦型钢支撑耗能模块,可有效控制岩土体水平位移和裂纹扩展速率。上述方法为复杂工程设施提供了系统化抗震设计方案。

3.3 基于监测预警与智能调控的动态抗震加固技术

针对洞室群在地震作用下的动态响应特点,采用实时监测技术和智能化算法创建起反馈控制机制,使加固方案得到自适应调整,大大提高工程系统整体抗震能力。首先在洞室群的关键部位(高边壁、交叉节点、重要设施基座等)布置各种类型的传感网络,有加速度计、位移传感器、应变片、压力检测器等,对地震动参数、结构变形数据、应力分布特征、渗流情况等进行准确的获取。利用物联网通信技术,把采集到的数据传送到云端服务器上,再用地质体、结构体系动力学仿真模型和损伤评价软件工具,对洞室群实际运行状况实施即时解析并发出警报。当监测指标接近或者超过安全阈值的时候,系统就会自动启动应急预案,对配置有可调节锚固装置的部位,用智能液压控制系统实时调节张紧力大小,平衡荷载分配、防止裂缝继续发展;安装有主动式消能减振模块的功能区,根据实际振动信号的变化动态调整阻尼系数或者弹性模量,提高能量耗散的效果。利用建筑信息模型(BIM)平台和信息技术,创建三维数字化双胞胎环境,将实验验证数据和理论推导结论综合起来,形成可视化的辅助决策支持系统,给灾害风险评价及应急处置策略制订赋予了科学支撑。该方法冲破了传统静态防护的思想,转而采取依靠感知驱动的动态反应办法,在保证安全性能的前提下达成资源的高效利用。

3.4 基于全生命周期性能提升的加固材料与施工工艺优化技术

提高洞室群抗震韧性关键技术,主要是加固材料性能优化和施工工艺精细化改进。通过对加固材料的成分组成和配比进行不断的调整,以达到高强度、高延展性、持久耐久性等目标,同时提高基底材料与加固材料之间界面的结合性能。高性能纤维增强复合材料(FRP)因为具有良好的性能,被广泛地用于支护结构的加固改造当中,特别适合于锚固件的安装、衬砌的修复以及裂缝的处理等等场景,对于水文地质情况比较复杂的区域,

一般选择具有较好防渗功能的注浆系统和专门的涂层技术。根据实际工程需要做有针对性的模拟分析和试验验证,保证设计方案安全可靠、满足要求。现场施工阶段重视全流程质量控制,使用先进的自动化设备准确控制钻孔位置偏差范围,用在线传感装置实时监测紧固情况,采用阶段性填充的方式分步推进灌注工作,配合超声波探伤等无损检测手段对核心部位的完整性进行评价,从而有效防止安全隐患的产生。按照模块化设计思想,对预制单元进行专业化加工,在工地快速拼装,从而加快整体进度,提高作业效率和成品质量。这些综合措施不但明显提高了加固系统综合防护能力及长期运行稳定程度,而且极大地延长了地下空间设施的服务年限,给其应对自然灾害、突发事件等提供重要的保障。

4 结语

高烈度地震区的地下水工程洞室群抗震韧性评价及加固技术研究有重大的现实意义和战略价值。本文主要研究提高该类结构抗震性能的主要途径,分析其对国家水资源安全、区域可持续发展的重要意义。从地质条件匹配性、结构承载能力优化、全生命周期经济效能三个方面给出一套系统的改善方案。根据地质环境适应性问题,提出了一种以岩石介质特性为基础的创新加固方法;为了提高结构稳定性,提出了能量耗散型防护体系,该体系将多功能减震装置与结构连接起来;同时建立了一个以物联网为核心的感知信息平台,从原来的静态监测变成了现在的动态预警,大大提高了灾害的应对速度;使用高强度复合材料,并采用精细的施工工艺,使工程的质量更加可靠,施工效率也得到提高。不但拓宽了传统岩土力学领域研究的范围,而且给新兴交叉学科发展提供实践支持。

参考文献

- [1]杜佳.中梁山膨胀围岩隧道衬砌结构力学性能分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(6):173-177.
- [2]韩澍琦.不同截面形状隧道地震响应规律及结构抗震性能的研究[D].桂林:桂林理工大学,2024.
- [3]周鑫.地震作用下公路隧道箱型预制仰拱结构稳定性研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.