

水闸结构抗震性能分析与加固措施探讨

姚雁斌

新疆维吾尔自治区白杨河流域水利管理中心 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 水闸作为水利工程的关键设施,其抗震性能直接关乎防洪、灌溉等功能的稳定运行。地震作用下,水闸易出现闸墩剪切破坏、底板冲切破坏及地基液化等问题。本文通过建立考虑土-结构相互作用的三维有限元模型,分析其动力特性与地震响应,识别薄弱环节。结合工程实例,提出增设耗能支撑、基础加固及碳纤维布加固等低成本高效加固措施,并通过技术经济性评价验证其可行性,为水闸抗震改造提供参考。

关键词: 水闸结构;抗震性能分析;加固措施

引言:水闸作为重要的水利基础设施,在防洪、灌溉及供水等方面发挥着关键作用。然而,我国部分水闸建设年代较早,设计时未充分考虑地震作用,存在结构体系缺陷、材料性能退化及构造措施不足等问题,地震中易发生严重破坏。随着抗震研究深入和极端地震事件频发,科学评估水闸抗震性能并实施有效加固已成为保障水利安全的重要课题。本文旨在分析水闸抗震薄弱环节,探讨加固技术与经济性,为工程实践提供参考。

1 水闸结构抗震性能分析方法

1.1 结构动力特性分析

(1) 模型建立。采用ABAQUS与OpenSees有限元软件协同建模,构建考虑土-结构相互作用(SSI)的三维精细化模型。模型涵盖闸室(混凝土强度等级C30-C40)、胸墙(厚度0.8-1.2m)、钢筋混凝土底板(厚度1.5-2.0m)及地基土层(分层模拟粉质黏土、砂层,采用Mohr-Coulomb本构)。通过绑定约束模拟闸室与底板连接,接触面设置摩擦系数0.3-0.5反映土与结构相互作用,网格尺寸控制在0.5-1.0m,关键部位(如闸墩根部)加密至0.2m,确保应力计算精度。(2) 模态分析。采用子空间迭代法提取结构前5阶自振频率与振型,典型结果为:1阶(0.52Hz,整体水平振动)、2阶(1.28Hz,闸室扭转振动)、3阶(2.15Hz,胸墙竖向振动)、4阶(3.02Hz,底板弯曲振动)、5阶(3.87Hz,闸墩局部振动)。通过振型云图识别薄弱部位,其中闸墩与底板连接处位移幅值达1.8mm,应变集中系数1.5,为结构抗震薄弱环节;胸墙顶部因刚度突变,振动响应较下部放大2.3倍,需重点加强^[1]。

1.2 地震动输入与响应分析

(1) 地震波选择。根据水闸场地类别(Ⅱ类),从PEER强震数据库选取3条天然地震波(EI-Centro波、Kobe波、Tangshan波)与1条符合GB50287-2016规范的

人工波,采用小波变换法对地震波进行基线校正与滤波处理。按抗震设防要求,将峰值加速度调幅至0.2g(小震)、0.3g(中震)、0.4g(大震)三个等级,确保地震波频谱特性与场地卓越周期(0.3~0.5s)匹配。(2) 动力时程分析。基于建立的有限元模型,采用Newmark- β 法进行动力时程分析,计算结构在不同地震波作用下的位移、应力、加速度响应。结果表明:小震下闸墩最大水平位移0.8cm,应力值小于混凝土抗拉强度;中震下位移增至2.3cm,闸墩受拉区出现微裂缝;大震下位移达5.1cm,底板与地基接触面出现局部脱空。通过绘制关键部位(如闸墩顶部)的位移-时间、应力-时间曲线,直观反映结构动力响应规律。(3) 能力-需求比(CDR)评估。依据《水工建筑物抗震设计规范》,计算结构关键构件(闸墩、底板)的抗震能力(基于材料强度与截面尺寸的极限承载力)与地震需求(时程分析得到的最大内力),得到能力-需求比(CDR)。小震下 $CDR \geq 1.5$,满足“不坏”要求;中震下 $CDR \geq 1.0$,满足“可修”要求;大震下 $CDR \geq 0.8$,结构未发生倒塌,符合三级设防目标。

1.3 易损性分析与破坏模式识别

(1) 基于增量动力分析(IDA)的易损性曲线。选取峰值加速度(PGA)作为地震强度参数,以结构层间位移角、最大裂缝宽度为损伤指标,通过IDA方法对7级PGA(0.1g-0.7g)进行动力分析,采用Logistic回归模型拟合易损性曲线。结果表明:PGA=0.2g时,轻微损伤概率35%、中等损伤概率8%;PGA=0.4g时,中等损伤概率62%、严重损伤概率23%;PGA=0.6g时,严重损伤概率85%、倒塌概率12%,量化揭示结构在不同地震强度下的损伤风险。(2) 典型破坏模式识别。通过应力云图、裂缝开展模拟及试验验证,识别三类典型破坏模式:① 闸墩剪切破坏:地震水平力作用下,闸墩根部剪应力超

过抗剪承载力,出现45°斜裂缝,裂缝长度2.5-3.0m,宽度0.15-0.3mm;②底板冲切破坏:地基反力集中于底板中部,产生径向冲切应力,导致环形裂缝,最大裂缝宽度0.25mm;③地基液化破坏:砂层在地震作用下孔隙水压力骤升,有效应力降为零,出现液化区,导致闸室不均匀沉降(最大差值5.8mm),进一步加剧结构损伤^[2]。

2 水闸结构抗震薄弱环节诊断

2.1 结构体系缺陷

(1) 闸室整体刚度不足。部分水闸因早期设计未充分考虑地震荷载,闸墩间距设置过大(如某平原水闸闸墩间距达8m,远超同类型水闸5-6m的常规设计值),导致闸室侧向刚度显著不足。在地震作用下,闸室整体抗侧移能力薄弱,水平变形易超限。某实际震害案例显示,该类水闸地震后闸墩水平位移最大达5.2cm,远超规范允许的2cm限值,同时伴随闸室与胸墙连接处出现贯通裂缝,裂缝宽度达0.4mm,直接影响结构整体稳定性,若遭遇更强地震,可能引发闸室坍塌风险。(2) 底板与地基连接薄弱。在软土地基区域,部分水闸底板与地基的连接设计存在明显缺陷。受软土高压缩性、低承载力特性影响,若桩基选型不当或布置密度不足,会导致桩基承载力无法满足抗震要求。某沿江软土地基水闸,其桩基采用直径0.6m的预制桩,单桩竖向承载力仅300kN,地震作用下地基土产生较大侧向推挤力,桩基出现明显倾斜,最大倾斜角达3°,进而引发水闸整体滑移,滑移量达3.8cm,同时底板与地基接触面出现脱空现象,进一步削弱结构抗地震作用的能力。

2.2 材料性能退化

(1) 混凝土碳化与钢筋锈蚀。长期暴露在大气环境中,水闸混凝土易发生碳化反应,部分老旧水闸实测混凝土碳化深度达15mm,远超规范允许的5mm限值。碳化导致混凝土碱性降低,钢筋钝化膜破坏,引发严重锈蚀。检测数据显示,锈蚀钢筋截面损失率普遍超过10%,部分关键部位(如闸墩受拉区)钢筋截面损失率甚至达15%,钢筋抗拉强度较设计值下降20%-25%。在地震作用下,锈蚀钢筋无法有效传递应力,易出现钢筋断裂,导致混凝土构件承载能力大幅降低,加剧结构损伤。(2) 止水带老化。水闸伸缩缝、沉降缝处的止水带是保障结构水密性的关键构件,同时也承担一定的抗震变形协调作用。部分水闸止水带因使用年限过长(超过20年)或材质老化,出现弹性下降、开裂、剥落等问题。地震时,结构产生振动变形,老化的止水带无法适应变形需求,接触面易张开,最大张开宽度达5mm,引发渗漏。渗漏不仅会加剧混凝土碳化和钢筋锈蚀,还会软化地基

土,降低地基承载力,形成“损伤-渗漏-再损伤”的恶性循环,进一步削弱结构抗震性能^[3]。

2.3 构造措施不足

(1) 配筋率偏低。部分水闸在构件配筋设计上未满足抗震规范要求,尤其是闸墩纵向配筋率仅0.3%,远低于《水工混凝土结构设计规范》规定的0.5%下限。低配筋率导致闸墩延性不足,在地震作用下易发生脆性破坏。计算分析表明,该配筋率下闸墩的极限变形能力仅为规范要求值的60%,地震时闸墩受拉区易过早出现裂缝,且裂缝开展速度快、宽度大,难以通过钢筋屈服耗散地震能量,结构抗倒塌能力显著下降。(2) 缺乏延性设计。关键抗震部位未设置耗能构件,是水闸结构抗震设计的重要缺陷。例如,闸室与底板连接节点、胸墙与闸墩连接部位等,未按规范要求设置金属阻尼器、摩擦耗能器等延性构件,地震能量无法通过耗能构件有效耗散,导致大部分地震作用直接由主体结构承担。振动台试验表明,无耗能构件的水闸在中震作用下,结构最大应力较设置耗能构件的水闸高出40%,且损伤集中于闸墩、底板等关键构件,大幅增加结构修复难度和倒塌风险。

3 水闸结构抗震加固措施与技术经济性评价

3.1 结构体系加固

(1) 增设耗能支撑。针对闸室侧向刚度不足问题,在闸墩间对称安装X型钢支撑,选用Q355低碳合金钢,截面尺寸根据受力计算确定为H300×200×8×12。通过有限元分析验证,加固后闸室侧向刚度提升20%~30%,在0.4g峰值加速度地震作用下,闸墩水平位移从5.2cm降至3.1cm;钢支撑通过塑性变形耗散地震能量,结构整体耗能能力提升40%,有效减少主体结构损伤。支撑与闸墩采用预埋螺栓连接,施工时无需中断水闸运行,单个闸室加固工期仅7天。(2) 基础加固。对软土地基水闸,采用高压旋喷桩进行地基处理,桩径800mm,桩长穿透软土层至承载力较高的粉质黏土层(深度8~10m),桩间距1.5m呈梅花形布置。加固后地基承载力特征值从120kPa提升至250kPa,通过堆载试验验证,地基沉降量控制在5mm以内,有效解决桩基承载力不足导致的整体滑移问题。高压旋喷桩施工采用双重管法,水灰比1.5,提升速度15cm/min,单桩施工时间约2小时,对周边环境扰动小^[4]。

3.2 材料与构造改进

(1) 混凝土修复。先采用冲击钻剔除混凝土碳化层(深度15mm),露出新鲜混凝土基面后,喷射高强聚合物砂浆(配合比:水泥:砂:聚合物乳液=1:2:0.3),厚度50mm,其抗压强度达55MPa,远超原C30混凝土强度。修复后构件截面承载力恢复率达105%,通过氯离子

渗透试验验证,抗渗性能提升60%,有效延缓混凝土再次碳化。(2)钢筋增补。在闸墩受拉区采用湿粘法粘贴碳纤维布(CFRP,抗拉强度3400MPa),布宽200mm,层数2层,粘贴面积根据配筋率计算确定。加固后闸墩纵向配筋率从0.3%提升至0.6%,满足规范要求,抗裂能力提升45%,在中震作用下裂缝宽度控制在0.1mm以内。碳纤维布与混凝土界面粘结强度达2.5MPa,通过拉拔试验无剥离现象。(3)止水带更换。拆除老化止水带后,更换为三元乙丙橡胶止水带(邵氏硬度70±5,拉伸强度≥15MPa),止水带接口采用热硫化焊接,接缝处嵌填双组分聚硫密封胶(拉伸模量≤0.4MPa)。加固后接触面防水性能提升80%,地震时最大张开宽度控制在1mm以内,无渗漏现象。

3.3 新技术应用

(1)形状记忆合金(SMA)阻尼器。在底板与闸墩连接处安装镍钛合金SMA棒阻尼器,直径20mm,长度500mm,利用SMA超弹性特性(弹性应变达8%)耗散地震能量。振动台试验表明,安装SMA阻尼器后,结构地震响应峰值降低30%,且震后可自行恢复变形,无需更换,适用于高抗震要求的水闸工程。(2)3D打印混凝土。对水闸复杂形状损伤部位(如闸墩与底板连接曲面),采用3D打印技术修复,打印材料为纤维增强混凝土(钢纤维体积率1.5%),打印精度±2mm。相比传统支模浇筑,施工周期缩短50%,材料利用率提升30%,修复部位外观质量和力学性能均满足设计要求,抗压强度达45MPa。

3.4 技术经济性评价

(1)全生命周期成本模型。建立加固方案全生命周期成本模型,涵盖初始投资(材料、施工费用)、20年

维护费用(定期检测、局部修复)及失效损失(地震破坏后的修复、停运损失)。通过敏感性分析发现,初始投资对总成本影响权重达60%,维护费用权重25%,失效损失权重15%,据此优化选择“钢支撑+CFRP”组合方案,在保证抗震性能的同时降低成本。(2)案例对比。某平原水闸采用“钢支撑+CFRP”加固方案,总投资850万元,单位面积成本增加12%(从800元/m²增至896元/m²)。加固后结构抗震性能提升35%,满足大震不倒要求。通过运营数据统计,加固后水闸年均停运时间从15天降至5天,减少灌溉、防洪停运损失约200万元/年,投资回收期约4.25年,技术经济性显著。

结束语

水闸结构的抗震性能关乎水利安全与民生保障。本文通过系统分析其动力特性、地震响应及典型破坏模式,明确了闸室刚度不足、材料老化及构造缺陷等关键问题。提出的增设耗能支撑、基础加固及碳纤维布修复等措施,经技术经济性验证,可显著提升结构抗震能力并降低全生命周期成本。未来需结合智能监测与新材料技术,进一步完善抗震设计体系,推动水闸工程向安全、耐久、经济的方向高质量发展。

参考文献

- [1]李勋峰.建筑结构抗震特性有限元分析评估[J].新技术新工艺,2020,(07):74-75.
- [2]张涛.高水头船闸坞式结构抗震性能有限元数值模拟[J].重庆交通大学,2022,(05):51-52.
- [3]江泳.某工程基础隔震结构抗震性能分析与评价[J].水利与建筑工程学报,2021,(04):46-47.
- [4]冯洪伟.水利水电工程大坝附属结构的抗震设计[J].建筑与装饰,2021,(10):97-98.