

地质条件对水闸闸室稳定性影响的数值模拟研究

夏 荣 闫辉雪 张海莹 蒋 芳 王 霞
淮安市水利勘测设计研究院有限公司 江苏 淮安 223001

摘要：本文围绕地质条件对水闸闸室稳定性的影响进行了数值模拟研究，介绍了水闸闸室的结构组成与工作原理，然后分析了闸室稳定性的主要影响因素及失稳形式。在数值模拟模型构建部分，详细阐述了几何模型与边界条件的设定、材料参数的选取、荷载与工况的设置以及模型验证的方法。从土体强度参数、地层结构、地下水条件等方面探讨了地质条件对闸室稳定性的影响，并进行了综合地质条件敏感性分析。本研究旨在为水闸工程的设计、施工和维护提供科学依据，确保闸室的长期稳定运行。

关键词：水闸闸室；地质条件；数值模拟；稳定性分析

1 水闸闸室结构组成与工作原理

水闸闸室是水闸实现挡水、泄水等功能的核心，结构复杂，各部分协同运作保障正常运行。结构上，闸室主要由闸墩、底板、闸门、胸墙、工作桥和交通桥构成。闸墩是重要承重结构，分隔闸孔，承受闸门传来的水压力等荷载，并传递给底板和地基，多采用满足强度和刚度要求的混凝土。底板是闸室基础，与地基接触，承受上部结构及水、土压力等荷载并均匀传递给地基，其厚度、尺寸依水闸规模、荷载和地基条件确定，有整体式和分离式等结构形式。闸门是控制水流的关键，通过启闭调节过闸流量和上下游水位，类型多样，按功能和要求选择。胸墙用于挡水，减少闸门高度，与闸墩、底板相连成挡水结构。工作桥在闸室顶部，安装启闭设备，供闸门启闭操作；交通桥连接两岸，方便通行。

工作原理基于水力学和结构力学。挡水时，闸门关闭，上游水位高形成水位差，闸室承受巨大水平水压力，靠自身结构强度和刚度抵抗，底板与地基摩擦力及地基反力维持抗滑稳定，自重等竖向荷载保证抗倾稳定。泄水时，闸门开启，水流下泄，闸室承受水流冲击力等荷载，水流通过闸孔产生复杂流态，可能冲刷和振动闸室，结构设计需考虑这些因素。此外，运行中还要考虑地下水、温度变化等因素，确保水闸长期安全可靠运行^[1]。

2 水闸闸室稳定性分析

2.1 闸室稳定性的主要影响因素

闸室稳定性分析是评估其在荷载作用下抵抗滑移、倾覆及地基承载破坏能力的关键，需综合地质条件与结构特性判断。地质条件对闸室稳定性影响显著。土体强度，如内摩擦角、黏聚力，决定地基抗剪能力；地层分布是否均质，影响应力传递路径的均匀性；地下水条

件，包括水位高低、渗流路径，会通过扬压力和渗透力改变荷载分布。结构特性方面，闸室尺寸影响抗弯刚度，长宽高比例不同，抵抗变形能力有别；材料强度，像混凝土标号、钢筋配筋率，决定结构承载力；构造形式，如底板分缝设计，处理不当可能引发应力集中或变形不协调。荷载作用上，水压力、扬压力、地震力、波浪力等动态荷载组合，可能超出设计阈值。施工与运行管理也不容忽视，地基处理质量，如压实度、均匀性，直接影响实际承载性能；闸门启闭顺序不当，会造成瞬时荷载突变；淤积控制失效，改变闸前水沙条件，影响长期稳定性。

2.2 闸室失稳的主要形式及危害

闸室失稳主要有四种形式及相应危害。抗滑稳定性不足时，洪水期水压力与地震惯性力叠加等水平荷载，超过闸室与地基间的摩擦力，闸室整体沿基底面滑移，可能引发闸门卡阻、启闭机损坏等次生灾害。抗倾覆稳定性不足时，单侧水位差过大或地基不均匀沉降等导致荷载偏心，闸室绕趾部旋转，结构开裂甚至整体倾覆，威胁上下游防洪安全。地基承载破坏时，地基应力超过极限承载力，软土地基可能产生过大沉降，砂土地基可能液化失稳，造成闸室倾斜、连接部位脱开等结构性损伤。渗透破坏时，高水位差下地下水渗流引发管涌或流土，土体颗粒流失形成渗透通道并扩展，最终导致地基塌陷或突涌。上述失稳形式均会造成工程结构损坏、下游农田淹没、人员伤亡及重大经济损失，需提前分析识别风险点，制定加固措施确保闸室安全运行^[2]。

3 数值模拟模型构建

本次数值模拟采用MidasGTSNX有限元分析软件，该软件在岩土工程与结构分析领域具有强大的建模与计算功能，可精准模拟复杂地质条件下的结构受力与变形特

性,支持三维建模、多物理场耦合分析及非线性计算,能满足水闸闸室与地基相互作用的模拟需求。

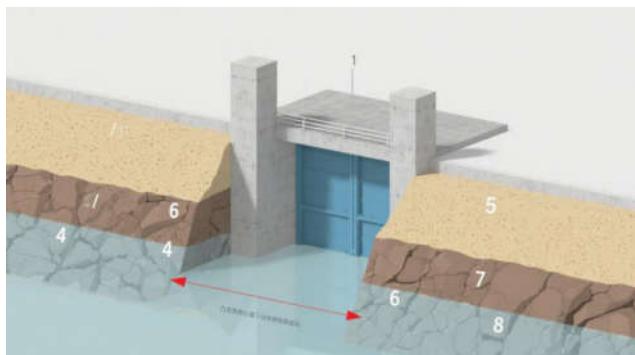
3.1 几何模型与边界条件

几何模型构建是数值模拟的基础,需依据水闸实际设计图纸与地质勘察资料,建立能精准反映闸室结构与地基状况的三维模型。确定模型范围至关重要,为减少边界条件对结果的影响,范围要足够大。通常闸室上下游方向长度取闸室长度的3-5倍,左右岸方向宽度取闸室宽度的2-3倍,地基深度取闸室底板厚度的5-10倍。建模时,要对闸室各结构部件,如闸墩、底板等进行精确几何描述,明确尺寸、形状与位置关系。同时,依据地勘资料准确模拟地基地层结构,包括土层分布、厚度等,复杂地质构造如断层、溶洞等也需在模型中体现。边界条件设定对模拟结果准确性影响显著。地基底部一般设为固定边界,限制竖向和水平方向位移;模型左右岸与上下游边界设为水平约束边界,限制水平位移,允许竖向位移,模拟无限地基受力状态。闸室结构与地基接触边界用接触单元模拟,考虑摩擦力和粘结力,反映两者相互作用。水与闸室结构接触边界设置水压力边界条件,根据上下游水位计算水压力大小与分布,并施加在闸室挡水面上。

3.2 材料参数选取

材料参数选取关乎数值模拟结果的可靠性,需结合工程实际情况与相关试验数据确定。闸室结构材料主

要是混凝土,其参数包括弹性模量、泊松比、密度、抗压强度、抗拉强度等。弹性模量和泊松比可按混凝土强度等级查阅规范选取,如C30混凝土弹性模量为 3.0×10^4 MPa,泊松比为0.2;密度通常取 2500kg/m^3 ,抗压和抗拉强度依试验数据或规范确定。地基土材料参数更复杂,不同类型土物理力学性质不同。砂土主要参数有密度、弹性模量等,内摩擦角在 25° - 40° 之间,粘聚力一般可忽略;黏土参数包括密度、压缩模量等,粘聚力相对较大,内摩擦角在 0° - 20° 之间。选取地基土参数时,优先采用地质勘察报告中的试验数据,如室内土工试验和现场原位测试数据。缺乏试验数据时,参考类似工程经验数据并结合实际调整。特殊地质材料,如断层破碎带、溶洞填充物等,强度和刚度低,弹性模量和抗剪强度参数取较小值。以下是水闸数值模拟材料参数表的详细数据:



水闸闸室数值模拟图

材料类型	弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	抗剪强度参数	参数来源
C30混凝土	3.0×10^4	0.2	2500	抗压 20.1MPa /抗拉 2.01MPa	《混凝土结构设计规范》
砂土	10-50	0.3	1600-1900	内摩擦角 25° - 40° /粘聚力 $0-5\text{kPa}$	土工试验数据
黏土	45797	0.35	1700-2000	内摩擦角 0° - 20° /粘聚力 $10-50\text{kPa}$	原位测试数据
特殊地质(断层/溶洞)	45792	0.4	1500-1800	内摩擦角 5° - 15° /粘聚力 $5-20\text{kPa}$	工程经验数据

3.3 荷载与工况设置

荷载施加需依据水闸实际运行工况,涵盖自重、水压力、土压力、地震荷载等。自重荷载依材料密度与体积计算,数值模拟中通过设密度自动施加;水压力是重要水平荷载,挡水工况下,上游按三角形分布、下游按矩形(有水)或零(无水)分布,泄水工况需考虑动水压力;土压力按库仑或朗肯理论计算,作用于闸室两侧及底板上下游面;地震荷载用等效静力法(地震加速度乘结构质量得地震力)或动力时程分析法(输入地震波模拟动力响应)施加。工况设置要考虑不同运行阶段与环境条件,包括正常挡水、设计洪水、检修、地震及遭遇特大洪水、地基不均匀沉降等特殊工况。对不同工况

模拟分析,可全面掌握闸室在各种情况下的稳定性^[3]。

3.4 模型验证

模型验证是保障数值模拟结果可靠的关键步骤,需将模拟结果与实际工程监测数据或物理模型试验结果对比分析。先收集水闸现场监测数据,像闸室沉降、位移、应力等,这些数据需在施工与运行阶段长期观测获取。接着,把数值模拟的相应参数计算值和监测值对比,分析误差。若误差在允许范围(通常小于10%),表明模型可靠;若误差大,则调整优化模型参数、边界条件等,重新模拟直至误差达标。物理模型试验也是有效验证方法,制作与实际水闸相似的模型进行试验,测量不同工况下的受力与变形。对比数值模拟与物理模型试

验结果,若前者能较好反映后者现象规律,说明模型构建合理。此外,验证时还需检查网格划分,确保质量和密度满足计算精度,避免网格致结果偏差。

4 地质条件对闸室稳定性的影响分析

4.1 土体强度参数的影响

土体强度参数,如抗剪强度、抗压强度等,是衡量土体抵抗外力破坏能力的重要指标。这些参数直接影响着水闸闸室的稳定性。当土体强度较低时,闸室在荷载作用下容易发生沉降和变形,甚至导致结构失稳。通过数值模拟分析,我们可以观察到,随着土体强度的增加,闸室的位移和应力分布逐渐趋于合理,稳定性得到显著提高。特别是在软土地基上建设的水闸,更需要对土体进行加固处理,以提高其承载能力,确保闸室的稳定性。土体强度参数的影响结果对比:模拟显示,当黏聚力从10kPa增至30kPa时,闸室最大沉降量从28mm降至12mm,基底最大压应力减小42%;内摩擦角每提高5°,抗滑安全系数提升0.2-0.3。

4.2 地层结构的影响

地层结构对闸室稳定性的影响主要体现在地基的均匀性和承载力上。不同的地层结构,如砂土、黏土、岩石等,具有不同的物理力学性质,对闸室的稳定性产生不同的影响。例如,砂土地基由于其颗粒间的空隙较大,容易发生渗透变形;而岩石地基则具有较高的承载能力和较好的抗变形能力。通过数值模拟,我们可以分析不同地层结构下闸室的应力分布和变形情况,为选择合适的地基处理方案提供依据^[4]。同时,对于复杂地层结构,还需要考虑地层间的相互作用和影响,以确保闸室的整体稳定性。地层结构的影响结果对比:砂土地基闸室水平位移达15mm,黏土地基为8mm,而岩石地基仅3mm;层状地基(上黏下砂)较均质黏土地基,闸室倾斜度增加1.8倍。

4.3 地下水条件的影响

地下水条件是水闸闸室稳定性分析中不可忽视的重要因素。地下水位的升降、渗透压力的变化都会对闸室的稳定性产生影响。当地下水位上升时,闸室基底受到的浮力增大,可能导致闸室整体上浮或侧壁倾覆。同时,地下水渗透产生的渗透压力也会增加闸室的侧壁压

力,降低其抗滑稳定性。通过数值模拟,我们可以模拟不同地下水位和渗透压力条件下闸室的稳定性情况,为制定合理的防水和排水措施提供依据。此外,对于地下水丰富的地区,还需要考虑地下水对地基土体的软化作用,以及对闸室结构的腐蚀影响。地下水条件的影响结果对比:地下水位上升2m时,闸室抗浮安全系数从1.5降至0.98;考虑渗透压力后,侧壁最大土压力增大35%,抗滑稳定系数降低22%。

4.4 综合地质条件敏感性分析

在实际工程中,水闸闸室所处的地质条件往往是复杂多变的,多种地质因素相互作用,共同影响着闸室的稳定性。因此,进行综合地质条件敏感性分析是十分必要的。通过数值模拟,可以模拟不同地质因素组合下的闸室稳定性情况,分析各因素对闸室稳定性的影响程度和敏感性。这有助于我们更全面地了解闸室稳定性的影响因素,为制定针对性的处理措施提供科学依据。同时,敏感性分析还可以帮助我们识别出关键地质因素,为水闸工程的设计和施工提供重要参考。

结束语

通过对地质条件对水闸闸室稳定性影响的数值模拟研究,深入了解了不同地质因素对闸室稳定性的影响机制。研究结果显示,土体强度、地层结构、地下水条件等因素均对闸室稳定性有显著影响。因此,在水闸工程的设计、施工和维护过程中,应充分考虑地质条件的影响,制定针对性的处理措施。本研究成果不仅为水闸工程的安全性评估提供了科学依据,也为类似工程提供有益的参考。

参考文献

- [1]王永梅.基于有限元法的水库坝体渗流稳定性分析及优化设计[J].岩土工程学报,2020,42(5):921-928.
- [2]郑立国.复杂地质环境下混凝土坝渗流控制关键技术研究[J].水利水电科技进展,2021,29(2):567-576.
- [3]刘颖.水闸结构稳定性分析及其抗震设计方法[J].珠江水运,2025(1):65-67.
- [4]李岩磊.地基上水闸闸室结构性稳定分析研究[J].水利科技与经济,2024,30(3):18-22.