

# 水闸工程的地基处理与稳定性分析

刘 雨<sup>1</sup> 闫辉雪<sup>1</sup> 王明东<sup>1</sup> 刘 洋<sup>2</sup>

1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司 江苏 淮安 223005

2. 江苏淮源工程建设监理有限公司 江苏 淮安 223005

**摘 要：**水闸工程地基处理与稳定性分析至关重要。本文先阐述地基常见问题，包括不均匀沉降、渗透破坏和承载力不足及其危害。接着介绍置换法、排水固结法等地基处理技术，以及极限平衡法、有限元法等稳定性分析方法。最后分析地质、荷载、施工和环境等因素对地基稳定性的影响，旨在为水闸工程地基处理与稳定性保障提供参考。

**关键词：**水闸工程；地基处理；稳定性分析

## 1 水闸工程地基常见问题

### 1.1 地基不均匀沉降

水闸工程中，地基不均匀沉降是较为突出的问题。由于水闸所处地质环境复杂，不同位置土层性质差异较大。当水闸荷载施加到地基上时，软弱土层压缩变形远大于坚实土层，从而导致不均匀沉降。不均匀沉降对水闸结构危害极大，会使闸室倾斜，影响闸门正常启闭，严重时闸门无法紧密闭合导致漏水；还会使结构产生附加应力，加速损坏，长期可能导致墙体裂缝甚至结构失稳。某水闸工程因地基不均匀沉降，闸室倾斜量达3.2‰，闸门渗流量增至0.8m<sup>3</sup>/s，严重影响工程功能。

### 1.2 渗透破坏

渗透破坏是水闸工程地基常见问题之一。水闸运行时，上下游水位差会产生水头压力，在水头压力作用下，水会通过地基土层中的孔隙或裂缝发生渗透。当渗透水流的水力梯度超过土体的临界水力梯度时，土体中的颗粒就会被水流带走，进而引发渗透破坏<sup>[1]</sup>。渗透破坏主要有管涌和流土两种形式：管涌多发生在无黏性土中，是指渗透水流将土体中的细颗粒通过粗颗粒孔隙带走并逐渐形成渗流通道的现象；流土则可在各类土体中发生，表现为土体颗粒群在渗透水流作用下同时发生移

动。管涌临界水力梯度计算公式为： $i_{cr} = \frac{Gs-1}{1+e}$ ，公式中，Gs为土粒相对密度，e为孔隙比。

某砂土地基水闸工程中，地基土的Gs = 2.65，e = 0.7，经计算其临界水力梯度 $i_{cr} = \frac{2.65-1}{1+0.7} = 0.97$ 。当该水闸运行中因上下游水位差增大，实际水力梯度达到1.1（超过临界值）时，地基发生管涌现象。管涌持续一段时间后，地基土体被逐渐掏空，导致闸室出现15cm的沉降，严重影响了水闸的正常运行。

### 1.3 地基承载力不足

如果地基承载力不足，在水闸荷载作用下，地基会发生过大的压缩变形，甚至可能导致地基失稳。地基承载力不足的原因主要有以下几个方面。一是地基土层的物理力学性质较差。例如，软黏土具有高压缩性、低强度和低渗透性等特点，其承载力往往无法满足水闸工程的要求。二是地基处理不当。在施工过程中，如果对地基的处理方法选择不合理或施工质量不达标，也会导致地基承载力不足。三是水闸荷载过大。随着水闸工程规模的不断扩大，其荷载也越来越大，如果地基设计时未能充分考虑荷载的变化，就可能出现地基承载力不足的问题。

## 2 水闸工程地基处理技术

各种地基处理技术对比如表1所示

地基处理技术	优点	缺点	适用范围
置换法	施工简单，工期短	适用于浅层软弱土层	局部软弱土层处理
排水固结法	提高地基强度，减少沉降	需要较长时间预压	饱和软黏土地基处理
复合地基法	提高承载力，改善抗震性能	造价较高	地基承载力不足或需提高抗震性能
防渗与截渗技术	有效防止渗透破坏	需要专业施工	地基渗透性强或需防渗的场合

### 2.1 置换法

置换法是将地基中不符合要求的软弱土层挖除，然后换填强度较高、稳定性较好的材料，如砂石、碎石、

灰土等，以提高地基承载力，减少地基沉降。置换法适用于浅层软弱土层的地基处理，具有施工简单、工期短等优点。在施工过程中，首先要准确确定软弱土层的

范围和深度。以某水闸工程为例,地基存在局部软弱土层,厚度约为2m。采用置换法进行处理时,将软弱土层精确挖除,然后换填级配碎石。开挖时要注意控制坑底的平整度和高程,确保换填材料的均匀分布,避免超挖或欠挖。换填材料不仅要符合设计要求,还需要进行分层压实。每层压实厚度一般不超过30cm,以确保压实度达到设计规定的标准。经过严格的分层压实后,地基承载力得到了显著提高。具体而言,该工程地基承载力从置换前的60kPa提升至置换后的180kPa,提升幅度高达200%。这一显著提升满足了水闸工程对地基承载力的严格要求,为水闸的安全运行提供了坚实保障。

## 2.2 排水固结法

排水固结法是提高饱和软黏土地基强度和稳定性的有效手段,该法通过设置排水通道(如砂井或塑料排水板)并施加预压荷载,促使地基土中孔隙水排出,实现土体固结。砂井排水需精确确定砂井间距与深度,某水闸工程中,砂井间距1.5m、深度12m,确保排水效果。塑料排水板则施工便捷、排水效率更高,该工程中相比砂井提升30%。预压荷载施加可采用堆载或真空预压方式,堆载预压通过堆放重物促地基固结,而真空预压则在地基表铺设密封膜抽真空形成负压,加速固结。该水闸工程选真空预压,经3个月预压,地基固结度达90%,沉降量稳控于15cm内,地基强度和稳定性显著提升。此法广泛应用于水闸等地基处理,成效显著<sup>[1]</sup>。

## 2.3 复合地基法

复合地基法以增强体(如桩体)置换或加强天然地基部分土体,形成桩体与桩间土共同担荷的人工地基。此法可提升地基承载力2-3倍,减少沉降30%-50%,还能改善抗震性能。常见形式有水泥搅拌桩、振冲碎石桩、CFG桩复合地基等。水泥搅拌桩用水泥作固化剂,经搅拌使地基土硬结成桩;振冲碎石桩靠振冲器成孔填碎石振密成桩;CFG桩由水泥等拌合形成高粘结强度桩,与桩间土构成复合地基。如某水闸工程地基承载力不足,采用水泥搅拌桩复合地基法,依地基土性质和荷载要求确定桩长10-15m、桩径0.5-0.8m、桩间距1.2-1.8m等参数,严控水泥掺量与搅拌质量,处理后承载力显著提升,满足设计要求。

## 2.4 防渗与截渗技术

为防水闸地基渗透破坏,常用垂直和水平防渗截渗技术。垂直防渗有帷幕灌浆(钻孔注水泥浆形成防渗幕,渗透系数可降至 $10^{-6}$ - $10^{-8}$ cm/s)、高压喷射灌浆(高压流冲击土体并混入水泥浆成墙)、混凝土防渗墙(挖槽孔浇混凝土成墙,厚度0.6-1.3m)。水平防渗是在上游

设铺盖,材料用黏土、沥青混凝土等,可延长渗径、降低渗透水力梯度。如某水闸工程地基渗透性强,采用帷幕灌浆(深度达不透水层)与上游1.5m厚黏土铺盖结合的防渗措施,经实际运行验证,有效防止了渗透破坏,保障了水闸安全。

## 3 水闸工程地基稳定性分析方法

### 3.1 极限平衡法

极限平衡法是水闸工程地基稳定性分析中的常用方法。它基于土体极限平衡理论,通过剖析土体在极限状态下的受力状况来判断地基稳定性。其基本思路是将滑动土体划分成若干土条,对每个土条进行受力分析,依据力的平衡条件建立方程,进而求解安全系数。安全系数是衡量地基稳定性的关键指标,当安全系数大于1时,一般认为地基稳定;小于1时,则判定地基不稳定。相关工程统计显示,对于一般水闸工程,当安全系数达到1.2-1.3时,地基稳定性较好;若低于1.05,则存在较大失稳风险。极限平衡法计算简单、概念清晰,在工程实践中应用广泛。不过,它也有局限性,比如假设滑动面已知,且未考虑土体的应力-应变关系。例如,在某小型水闸工程中,采用极限平衡法计算得出安全系数为1.15,但后续结合工程经验发现,该区域地下水位变化较大,对计算结果产生一定影响,需综合分析后确定地基稳定性。所以,实际应用中要结合工程经验和现场实际情况综合考量计算结果。

### 3.2 有限元法

有限元法作为一种数值分析方法,能模拟土体复杂力学性质和边界条件,更精准地分析水闸工程地基稳定性。它将地基土体离散为有限个单元,通过建立单元刚度矩阵和整体刚度矩阵,求解出土体应力、应变和位移分布。在有限元分析中,可考虑土体非线性、弹塑性等特性,以及地基与水闸结构的相互作用。通过分析,能获取地基在不同荷载作用下的变形和应力状态,以此判断地基稳定性<sup>[3]</sup>。以某大型水闸工程为例,该工程规模较大,水闸荷载复杂且动态变化。采用有限元法分析时,考虑了地基土的非线性弹塑性模型,将地基划分为数千个单元进行计算。经计算,得到地基最大沉降量为15cm,在规范允许范围内;应力分布显示,地基部分区域应力集中,但整体应力水平未超过土体承载能力。这些结果为水闸工程设计和施工提供了科学依据,提高了地基稳定性分析的准确性和可靠性。

### 3.3 可靠度分析法

可靠度分析法基于概率论和数理统计,考虑了各种不确定因素对水闸工程地基稳定性的影响。它把地基稳

定性分析中的参数当作随机变量,通过建立概率模型,计算地基失稳概率,即可靠度指标。该方法能更全面评估地基稳定性,为工程决策提供更科学依据。实际应用中,需收集大量现场数据和试验资料,确定各参数概率分布特征。例如,对某地区10个类似水闸工程地基土的物理力学性质参数进行统计分析,发现土的粘聚力服从正态分布,均值约为20kPa,标准差为3kPa。确定参数分布后,采用合适可靠度计算方法,如一次二阶矩法、蒙特卡洛模拟法等计算地基可靠度指标。某重要水闸工程进行地基稳定性分析时,采用可靠度分析法,通过对地基土物理力学性质参数、水闸荷载等分析,确定各参数概率分布。采用蒙特卡洛模拟法进行10000次模拟计算,得出地基在规定设计使用年限内失稳概率为0.03,可靠度指标较高,满足工程安全要求。该方法为该水闸安全运行提供了更可靠保障。

#### 4 影响水闸工程地基稳定性的因素分析

##### 4.1 地质条件因素

地质条件是影响水闸工程地基稳定性的重要因素之一。不同的地质条件对地基稳定性的影响差异很大。如果地基土层为坚硬岩石,其承载力高,变形小,地基稳定性较好;而如果地基土层为软弱土,如淤泥、淤泥质土等,其承载力低,压缩性高,地基稳定性较差。地质构造中的断层、裂隙等也会影响地基的完整性,降低地基的稳定性。例如,某水闸工程所在地区存在断层构造,断层破碎带内的土体强度较低,在施工过程中需要对断层破碎带进行特殊处理,否则会影响水闸地基的稳定性。

##### 4.2 荷载因素

水闸工程所承受的荷载对地基稳定性有直接影响。荷载主要包括水闸自重、水压力、地震力等。水闸自重是长期作用在地基上的荷载,其大小和分布会影响地基的沉降和应力状态。水压力是水闸运行过程中作用在闸门和地基上的主要荷载,水压力的大小和变化会影响地基的稳定性。地震力是一种偶然荷载,但在地震发生时会对水闸地基产生巨大的冲击力,可能导致地基失稳。在设计水闸工程时,需要充分考虑各种荷载的组合情况,合理确定地基的设计荷载,确保地基在各种荷载作用下都能保持稳定。例如,在地震多发地区建设水闸工程时,需要按照抗震设计规范的要求,对地基进行抗震设计。采用合适的抗震措施,如设置抗震缝、加强地基处理等,提高地基的抗震性能,保障水闸在地震作用下

的安全。

##### 4.3 施工因素

施工因素对水闸工程地基稳定性也有重要影响。施工质量的好坏直接关系到地基处理的效果和地基的稳定性。例如,在置换法施工中,如果换填材料的质量不达标或压实度不够,会导致地基承载力不足;在排水固结法施工中,如果排水通道设置不合理或预压荷载施加不当,会影响地基的固结效果。施工过程中的开挖、填筑等操作也会对地基产生扰动,影响地基的稳定性。

##### 4.4 环境因素

环境因素也会对水闸工程地基稳定性产生影响。环境因素主要包括地下水位变化、气候变化、周边工程活动等。地下水位的变化会引起地基土的物理力学性质发生变化,如地下水位上升会使土体的含水量增加,强度降低;地下水位下降则可能导致土体产生附加沉降。气候变化中的降雨、洪水等也会对地基稳定性产生影响。降雨会使地基土的含水量增加,增加地基的沉降和渗透破坏的风险;洪水则可能对水闸地基产生冲刷作用,破坏地基的稳定性。周边工程活动,如基坑开挖、爆破等,也可能对水闸地基产生振动和扰动,影响地基的稳定性<sup>[4]</sup>。例如,某水闸工程附近进行基坑开挖施工,由于开挖过程中未采取有效的支护措施,导致周边土体发生位移,对水闸地基产生了影响。水闸出现了轻微的倾斜和沉降现象,经过监测和分析后,及时采取了加固措施,才保障水闸的安全运行。

#### 结束语

水闸工程地基处理与稳定性分析关乎工程安全与长久运行。从常见地基问题到多样处理技术,再到精准分析方法和多因素影响考量,各个环节紧密相连。未来,需持续优化处理技术,提升分析方法的精准度,充分考虑各类影响因素。通过不断探索与实践,为水闸工程打造稳固地基,保障其稳定发挥挡水泄水等关键功能。

#### 参考文献

- [1]曾俊平.张拉预应力施工影响下水闸加固结构应力稳定性研究[J].海河水利,2022,(01):111-114.
- [2]吕红松.简析水利工程中水闸施工技术[J].大众标准化,2020,(12):38-39.
- [3]栗敏燕.某闸工程地基处理方案比选及稳定性分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(1):51-53.
- [4]麦浚康.河道水闸地基处理方案及渗流稳定性分析[J].云南水力发电,2025,41(6):33-36.