

# 水利工程水闸基础结构设计要点分析

文 / 吴顺继 济南城建设计研究院有限责任公司

高文文 北京禹冰水利勘测规划设计有限公司山东分公司

**摘要:** 水闸是水利工程体系中不可或缺的构筑物,其基础结构的设计精细程度直接关联到水闸的持久安全运行及其整体稳定性。本文旨在深入剖析水利工程中水闸基础结构设计的核心要素,通过详尽探讨基础结构类型、荷载计算的精确方法以及稳定性评估等方面,并结合实例解析,揭示水闸基础结构设计中的关键技术路径与需谨慎对待的要点,以期同类水利工程的设计实践提供有价值的参考。

**关键词:** 水利工程;水闸;基础结构;设计要点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.076

## 引言

在当代社会,水利工程对水资源进行科学调配、有效防洪排涝及保障农业灌溉等方面扮演着举足轻重的角色。水闸是水利工程的枢纽部件,其基础结构设计的合理性直接关乎水闸的稳固性、安全性及运行效能。随着水利工程建设规模日益扩大,加之复杂地质条件的频现,对水闸基础结构设计提出了更为严苛的要求。传统设计策略在面对新挑战时,诸如基础不均匀沉降、抗滑稳定性不足等问题逐渐显现,凸显出优化设计的紧迫性。因此,系统探究水利工程水闸基础结构的精髓,融合前沿技术与理论,完善设计方案,成为确保水利工程安全高效运行的关键所在。

## 一、水闸基础结构类型

### (一) 重力式基础

重力式基础是水闸基础结构设计中的经典类型,其设计哲学在于依赖自身庞大的重量实现稳定。此类基础通常由厚重的混凝土块或石块构筑而成,展现出结构简洁、施工便捷及稳定性强的特点。在地质条件优越、地基承载能力强的环境中,重力式基础能够卓越地承载水闸上部结构传递的荷载,并将其有效传递至地基深处<sup>[1]</sup>。然而,重力式基础亦有其局限性,其庞大的自重对地基承载能力提出了较高要求,于地质条件不佳的地区可能难以适用。此外,高昂的造价亦需在经济条件受限的项目中审慎考量。

### (二) 桩基础

桩基础通过桩身将上部荷载传递至深层稳定土层,是应对复杂地质条件的有效手段。桩的类型包括预制桩与灌注桩,选择依据在于具体的地质条件与工程需求。桩基础的优势在于其能够克服地质条件恶劣、承载能力有限的难题,通过深层土层的支撑,提供卓越的承载能力与稳定性。在软土地基或存在不均匀沉降风险的区域,桩基础展现出其独特的优势。同时,桩基础的施工灵活性高,可根据场地条件与工程要求灵活调整。然而,桩基础的施工工艺复杂,质量控制要求严格,且成本相对较高<sup>[2]</sup>。

### (三) 筏板基础

筏板基础以其良好的整体性著称,能够有效调节不

均匀沉降。其设计为一块大面积钢筋混凝土板,将水闸基础整体连接,形成一体化的结构。在软土地基中,筏板基础应用广泛,因其能够均匀分布荷载,显著减少地基的不均匀沉降,从而确保水闸结构的稳固与安全。此外,筏板基础具备良好的抗震性能,在地震等自然灾害面前展现出较强的结构韧性。然而,筏板基础的混凝土用量大,施工周期长,且造价不菲,需在设计中综合权衡。

## 二、水闸基础结构荷载计算

### (一) 自重荷载

水闸的自重荷载源自其闸体结构与基础结构的固有重量。在评估这一荷载时,必须细致入微地考量各构成组件的材料密度及其几何尺寸。闸体结构,囊括了闸墩、闸底板、胸墙以及工作桥等关键元素,它们通常由混凝土或钢筋混凝土精心构筑,密度大致在2300至2500千克每立方米之间。通过精确测量或详尽计算各构件的体积,再乘以对应的材料密度,即可精确求得各部分的自重。

基础结构的自重计算则依据其特定的类型与尺寸进行。基础形式多样,常见的有筏板基础与桩基础等。对于筏板基础,自重可通过计算其总体积与材料密度的乘积而得出。至于桩基础,则需依据桩身的长度、横截面积以及材料密度,来精确计算每一根桩的自重<sup>[3]</sup>。在实际操作中,为了简化复杂的计算过程,通常会将结构细分为多个规则的几何形状,分别进行计算,再将各部分的自重累加,从而得出水闸结构的整体自重荷载。

### (二) 水压力

#### 1. 静水压力

静水压力,即水闸在静止水体作用下所承受的压力,其大小与水深成正比,作用方向始终垂直于受压面。对于直立的闸墩与胸墙,静水压力的计算公式为 $P = \gamma h$ ,其中 $P$ 代表静水压力, $\gamma$ 为水的容重, $h$ 为计算点处的水深。而对于倾斜的闸底板,静水压力的分布则呈现出三角形或梯形的特征,此时需要先确定压力中心的位置,进而计算出压力合力<sup>[4]</sup>。

#### 2. 动水压力

动水压力,则是水流在运动过程中对水闸结构施加的压力。在水闸的过流区域,如闸孔、消力池等,由于

水流速度较快,会产生显著的动水压力。动水压力的计算相对复杂,需综合考虑水流的流速、流态、边界条件等多重因素。常见的计算方法包括动量定理法与能量方程法等。尽管在某些简化计算中,可以依据经验公式来估算动水压力的大小,但对于至关重要的水闸工程而言,应采用更为精确的水力学计算方法,以确保结果的准确性。

### (三) 土压力

#### 1. 主动土压力

当水闸结构向土体方向移动或发生转动,导致土体有向外滑动的趋势时,土体会对水闸结构产生主动土压力。主动土压力的大小受到土的性质、墙体位移量、墙高以及填土表面形状等多种因素的影响。在计算主动土压力时,常用的理论有库仑土压力理论与朗肯土压力理论。库仑理论适用于各种填土表面与墙背倾斜的情况,但计算过程相对繁琐;而朗肯理论则更适用于墙背垂直、光滑且填土表面水平的情况,计算过程相对简洁。

#### 2. 被动土压力

当水闸结构受到外力作用而推向土体时,土体会对水闸结构产生被动土压力。与主动土压力相比,被动土压力通常要大得多。在计算被动土压力时,方法与计算主动土压力类似,但由于其数值较大,因此在实际工程中需要格外谨慎。在水闸设计中,应根据具体的工况与边界条件,精心选择合适的土压力计算理论与方法,以确保结构的安全性与稳定性。

### (四) 地震荷载

在地震设防区域,地震作用对水闸基础结构的影响至关重要,不容忽视。在计算地震荷载时,通常采用反应谱法或时程分析法。

#### 1. 反应谱法

反应谱法是基于地震反应谱曲线,结合结构的自振周期与阻尼比,来计算地震作用下结构的内力与变形。地震反应谱曲线能够直观反映不同周期结构在地震作用下的最大反应。在水闸基础结构的设计中,首先需要准确确定结构的自振周期与阻尼比。自振周期可通过结构的质量与刚度计算得出,而阻尼比一般则根据结构材料与构造来确定。随后,根据地震设防烈度与场地条件,选取相应的地震反应谱曲线,进行地震作用的计算。

#### 2. 时程分析法

时程分析法则是通过直接输入地震加速度时程曲线,对结构进行动力分析,从而得出结构在地震作用下的全过程响应。这种方法能够更为准确地反映结构在地震作用下的非线性行为,但计算量相对较大。在进行地震荷载计算时,还需充分考虑水闸基础与地基的相互作用,以及地震动的空间变化等复杂因素。

### 三、水闸基础结构稳定性分析

#### (一) 抗滑稳定性分析

在水闸的运行过程中,其基础结构难免遭受来自水平方向的多种荷载,如水流强烈冲击与土压力等。为防

止水闸因此发生滑移,进行抗滑稳定性分析至关重要。该分析的关键在于准确计算抗滑力与滑动力之比,即抗滑安全系数。抗滑力主要由两部分组成:一是基础底面与地基间的摩擦力,其大小取决于摩擦系数与垂直压力的乘积,摩擦系数则与地基土性质密切相关,需通过严格试验或参照行业标准确定;二是基础前方土体在被动状态下产生的土压力,可依据土压力理论详细计算。

滑动力则包括水流冲击力、水平土压力等因素。水流冲击力的计算需考虑水流速度、流量及水闸形状等;水平土压力则需根据土体性质、填土高度等条件,采用相应方法计算。

#### (二) 抗倾稳定性分析

水闸基础结构在荷载作用下,除了滑移风险外,还可能面临倾覆的威胁。抗倾稳定性分析旨在全面评估水闸在各种荷载组合作用下,是否会绕某一特定轴线发生倾覆。这一分析过程通常涉及倾覆力矩和抗倾覆力矩的精确计算。倾覆力矩是由水平荷载和竖向荷载共同对倾覆轴线产生的力矩效应;而抗倾覆力矩则主要由结构自重、基础填土重量以及基础底面与地基间的摩擦力对倾覆轴线产生的力矩效应所组成。

在进行倾覆力矩和抗倾覆力矩的计算时,需精确确定荷载的大小、作用位置及方向,同时需准确掌握结构和基础的几何尺寸及重量分布。为确保水闸基础结构的抗倾稳定性,所计算出的抗倾安全系数同样需满足相关行业标准的要求。若该系数不足,则需及时采取相应的抗倾措施,如增加结构重量、调整结构布局、设置锚拉结构等,以提升其抗倾能力。

#### (三) 地基承载力验算

地基承载力是水闸基础设计的核心要素,指的是地基单位面积所能承受的最大压力极限。一旦水闸基础传递至地基的压力突破此极限,将引发地基受损,严重威胁水闸的安全运行。因此,精确验算地基承载力至关重要。验算过程主要包括:①通过现场勘探及试验,精确测定地基土的物理力学性质,如重度、内摩擦角及粘聚力等;②结合地基土质、基础形状与尺寸,选用合适的地基承载力计算方法,如理论公式、规范表格或经验公式等;③对比基础底面平均压力、最大压力与地基承载力特征值,若平均压力不超过特征值,且最大压力不超过特征值的1.2倍,则地基承载力达标。否则,需采取地基加固措施,如换填、强夯或深层搅拌桩等,以强化地基承载能力,确保水闸基础结构的稳固与安全<sup>[5]</sup>。

### 四、水利工程水闸基础结构设计案例分析

#### (一) 工程概况

某水利工程水闸主要用于调节水位、控制流量,以满足灌溉、防洪等需求。水闸所处位置地质条件复杂,为软土地基,对基础结构的稳定性要求较高。

#### (二) 地质勘察

依据详尽的地质勘探报告,水闸所在地基土壤主要

由软土层构成，其物理力学特性已被精确测定，并汇总于表1中，以供后续设计与施工参考。

表1 水利工程水闸地质勘察情况

土层名称	厚度 (m)	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 (°)	粘聚力 (kPa)	压缩模量 (MPa)
淤泥质粉质粘土	5 - 8	17.5	8	12	3.0
粉质粘土	8 - 12	18.5	15	25	5.0

### (三) 水闸基础结构设计

#### 1. 荷载计算

鉴于水闸上下游存在5m的水位差，经细致计算，得出作用于闸墙上的水压力为250kN/m。同时，结合闸墙前后填土的特质与高度差异（前侧3m，后侧4m），进一步计算出前侧土压力为52.5kN/m，后侧土压力为74kN/m。此外，考虑到工程所在地地震设防烈度为7度，地震作用力被估算为80kN，以确保结构在极端条件下的安全性。

#### 2. 桩基础设计

综合地质条件与荷载分布的实际状况，决定采用预制混凝土桩作为基础的支撑结构，桩径设定为0.5m。经过精密计算，最终确定所需桩的数量为30根，并采用梅花形布局以优化桩群的整体稳定性，桩间距被精确设定为2m。

### (四) 基础结构稳定性验算

依据相关行业标准与规范，对水闸在各种工况下的抗滑稳定安全系数进行了详尽验算，结果汇总于表2中。

表2 抗滑稳定性验算

工况	计算安全系数	规范要求安全系数	是否满足
正常运行工况	1.35	1.25	满足
洪水工况	1.20	1.10	满足

同样计算各种工况下的抗倾覆稳定安全系数，如表3所示：

表3 抗倾覆稳定安全系数

工况	计算安全系数	规范要求安全系数	是否满足
正常运行工况	1.50	1.40	满足
洪水工况	1.40	1.30	满足

此外，地基土的承载力特征值为120kPa，在正常运行工况下，基础底面压力为100kPa，洪水工况下则为110kPa。经验算，两种工况下的地基承载力均符合设计要求。

### (五) 水利工程水闸基础结构设计结果及实际运行效果

#### 1. 设计结果

在全面考量工程地质特性、承载需求及施工条件等因素的基础上，最终选定预制混凝土桩作为水闸基础的主要支撑形式。预制混凝土桩凭借其质量可控、施工高效及承载性能优异等特点，成为理想选择。依据地质勘探报告与详尽的计算分析，桩长被确定为20m，这一长

度足以穿透软弱土层，将上部荷载有效传递至深层稳定土壤，从而确保基础的稳固性。

桩径选定为500mm，这一尺寸既能满足承载需求，又能在施工过程中确保桩身质量与施工的便捷性。通过严谨的计算与验算，单桩承载力被确定为800千牛。设计过程中，充分考虑了各种潜在的不利因素，以确保桩基础在各种工况下均能安全可靠地发挥作用。

#### 2. 实际运行效果

水闸自建成并投入使用以来，其基础结构的沉降情况一直受到密切监测。监测数据清晰地显示，基础结构未出现显著的沉降现象，所有沉降量均严格控制在设计允许范围之内。这一结果表明，桩基础有效地分担了上部结构的荷载，并成功控制了地层的压缩变形。通过设置专门的观测点，对水闸基础的水平位移进行了持续观测。观测结果显示，基础结构的水平位移极小，远低于设计限值。这一发现充分证明了桩基础在抵御水平荷载方面的卓越性能，确保了水闸在水流作用下的稳定性。

经过细致的检查，基础结构未发现任何明显的裂缝。这一事实表明，在承受荷载与环境作用时，基础结构的内部应力分布均匀，整体性与耐久性均表现出色。综合各项监测数据与检查结果，可以得出结论：水闸基础结构运行稳定可靠，完全符合设计要求。这一成果为水闸的长期安全运行提供了坚实的保障，同时也验证了基础结构设计的科学性与合理性。

### 结语

水闸基础结构设计作为水利工程设计的关键环节，必须综合考虑地质条件、荷载状况、运行需求等多重因素。在设计实践中，应确保荷载计算的准确性，合理选择基础结构类型，并开展全面的稳定性分析，以构筑安全可靠的水闸基础结构。同时，通过深入剖析实际案例，不断积累宝贵经验，提升水闸基础设计的整体水平，为水利工程的建设与运行提供坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 何立慧. 水利工程水闸基础结构设计要点研究[J]. 价值工程, 2024, 43(36): 57-59.
  - [2] 李朦, 胡红胜, 房伟, 等. 基于软土桩基础水闸应力稳定性分析[J]. 科学技术创新, 2025, (03): 101-104.
  - [3] 林瑞鹏. 水闸基础防渗加固高压摆喷灌浆技术探讨[J]. 四川建材, 2021, 47(08): 121-122.
  - [4] 樊志远, 崔朕铭, 黄海田, 等. 沉井基础水闸整体结构及稳定性分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(03): 100-102+107.
  - [5] 崔朕铭, 蔡新, 樊志远, 等. 某水闸地基桩基础与沉井基础方案优化选择[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 126-128.
- 作者简介：吴顺继（1987.01.23），男，汉，山东省济南人，本科，毕业于山东财经大学，一级造价工程师、助理工程师，研究方向：水利工程。