

水厂水池结构抗倾覆稳定性设计方法研究

文 / 刘争教 西安市政设计研究院有限公司

郭 宁 西安市政设计研究院有限公司

摘要：本文围绕水厂水池结构抗倾覆稳定性设计方法展开深入研究。通过阐述水厂水池工程背景与抗倾覆稳定性的重要性，系统分析影响水池结构抗倾覆稳定性的因素，详细探讨传统与现代设计方法，并结合实际案例验证方法的有效性，同时提出优化设计措施。旨在为水厂水池结构抗倾覆稳定性设计提供科学、合理的方法与参考依据，保障水厂水池结构在复杂工况下的安全稳定运行，提升水厂供水系统的可靠性。

关键词：水厂水池；抗倾覆稳定性；设计方法；影响因素；优化措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.078

引言

随着城市化进程的加速，城市人口数量不断增加，对水资源的需求日益增长，水厂作为城市供水的基础设施，其建设规模和数量也在持续扩大。水厂水池作为水厂中储存和调节水量的关键构筑物，承担着保障城市供水稳定的重要任务。

一、水厂水池结构抗倾覆稳定性概述

抗倾覆稳定性是指水池结构在各种外部荷载作用下，抵抗绕某一倾覆点发生倾覆转动的能力。水厂水池在正常运行过程中，会受到水压力、土压力、风荷载、地震作用等多种荷载的共同作用，当这些荷载产生的倾覆力矩超过水池结构自身重力及基础反力产生的抗倾覆力矩时，水池就会发生倾覆破坏。水池结构的抗倾覆稳定性直接关系到水厂的正常运行和城市供水安全，一旦水池发生倾覆，将导致供水系统瘫痪，造成巨大的经济损失和社会影响。因此，在水厂水池结构设计中，必须高度重视抗倾覆稳定性设计，确保水池结构在各种工况下都能保持稳定。

二、影响水厂水池结构抗倾覆稳定性的因素分析

（一）荷载因素

水压力：水压力是水厂水池承受的主要荷载之一，其大小与水深成正比。在水池蓄水过程中，池壁受到的水压力会随着水位的上升而不断增大，且水压力的分布呈三角形，池底所受水压力最大。过高的水压力会使水池结构产生较大的倾覆力矩，尤其是在水池一侧水位较高、另一侧水位较低的工况下，水压力差产生的倾覆力矩更为显著。

土压力：对于埋地式水池，土压力对其抗倾覆稳定性有着重要影响。土压力分为主动土压力、被动土压力和静止土压力。在水池施工和运行过程中，当水池周围土体发生位移时，会产生主动土压力或被动土压力。主动土压力会使水池向土体位移方向产生倾覆趋势，而被动土压力则有助于抵抗水池的倾覆。此外，地下水对土压力也有影响，当地下水位较高时，土体的有效重度减小，

土压力也会相应发生变化。

风荷载：对于露天设置的水厂水池，风荷载是不可忽视的荷载因素。风荷载的大小与风速、水池的体型系数和迎风面积有关。强风作用下，风荷载会对水池结构产生较大的水平推力，尤其是在高层建筑附近的水池，由于气流的干扰，风荷载的作用更为复杂，可能会增加水池的倾覆风险。

地震作用：地震作用是一种动态荷载，具有不确定性和复杂性。在地震发生时，水池结构会受到水平地震力和竖向地震力的作用。水平地震力会使水池产生水平位移和倾覆力矩，竖向地震力则会改变水池基础的受力状态，降低水池的抗倾覆能力。地震作用的大小与地震烈度、场地条件和水池结构的动力特性等因素有关。

（二）结构因素

水池结构尺寸：水池的高度、宽度和长度等尺寸参数对其抗倾覆稳定性有直接影响。一般来说，水池高度越高，重心位置越高，在相同荷载作用下产生的倾覆力矩越大，抗倾覆稳定性越差；水池宽度和长度越大，基础底面积越大，抗倾覆力矩也越大，有利于提高水池的抗倾覆稳定性。

基础形式：水池基础形式的选择直接影响其抗倾覆能力。常见的水池基础形式有独立基础、条形基础、筏板基础和桩基础等。不同的基础形式在承载能力、沉降性能和抗倾覆性能方面存在差异。例如，桩基础能够将水池荷载传递到深层稳定土层，具有较好的抗倾覆性能；而筏板基础则通过扩大基础底面积来提高抗倾覆能力，但在软弱地基上可能会产生较大的沉降。

材料性能：水池结构所采用的材料性能对其抗倾覆稳定性也有重要影响。混凝土的强度等级、弹性模量和抗渗性能，钢筋的强度和配筋率等都会影响水池结构的承载能力和变形性能。高强度的混凝土和合理的配筋能够提高水池结构的刚度和强度，增强其抵抗倾覆的能力。

（三）地质因素

地基土的物理力学性质：地基土的物理力学性质，

如土的密度、含水量、孔隙比、压缩模量、抗剪强度等，直接影响水池基础的承载力和稳定性。在软弱地基上建造水池，由于地基土的承载能力较低，容易产生较大的沉降和不均匀沉降，从而降低水池的抗倾覆稳定性。此外，地基土的抗剪强度不足还可能导致地基土发生滑动破坏，危及水池结构的安全。

地下水情况：地下水的存在会改变地基土的力学性质和水池结构的受力状态。当地下水位较高时，地基土会受到浮力作用，有效重度减小，地基承载力降低。同时，地下水对水池底板产生向上的水浮力，与水池结构重力方向相反，会减小水池结构的抗倾覆力矩。此外，地下水的渗流还可能引起地基土的渗透破坏，如管涌、流砂等，进一步影响水池的稳定性。

三、水厂水池结构抗倾覆稳定性设计方法

(一) 传统设计方法

静力平衡法：静力平衡法是水厂水池结构抗倾覆稳定性设计中最常用的传统方法之一。该方法基于刚体静力平衡原理，通过计算水池结构在各种荷载作用下产生的倾覆力矩和抗倾覆力矩，然后根据抗倾覆稳定性验算公式进行计算。抗倾覆稳定性验算公式为： $K_t = M_o / M_r \geq [K_t]$ ，其中： K_t 为抗倾覆安全系数， M_r 为抗倾覆力矩， M_o 为倾覆力矩， $[K_t]$ 为允许抗倾覆安全系数，一般根据工程重要性和荷载组合情况取值。在计算过程中，需要准确确定各种荷载的大小和作用位置，并考虑荷载的组合效应。静力平衡法概念清晰，计算简单，但该方法将水池结构视为刚体，忽略了结构的变形和地基与结构的相互作用，在一些复杂工况下计算结果可能不够准确^[1]。

经验系数法：经验系数法是在大量工程实践的基础上，总结出的一种简化设计方法。该方法通过对不同类型、不同规模的水厂水池进行分析和统计，得出一些与水池结构尺寸、荷载条件等相关的经验系数，用于估算水池结构的抗倾覆稳定性。例如，根据水池的高度、宽度和深度等尺寸参数，结合当地的工程经验，确定水池基础的最小尺寸和埋深，以满足抗倾覆稳定性要求。经验系数法计算简便，能够快速得到初步设计结果，但由于其依赖于工程经验，缺乏严格的理论依据，对于一些新型结构或复杂地质条件下的水池设计，其适用性和准确性受到一定限制。

(二) 现代设计方法

有限元分析法：有限元分析法是一种基于计算机技术的数值分析方法，能够对水厂水池结构进行精细化的力学分析。该方法将水池结构离散为有限个单元，通过建立结构的有限元模型，考虑结构的材料非线性、几何非线性和边界条件的复杂性，准确模拟水池结构在各种

荷载作用下的受力和变形情况。在抗倾覆稳定性分析中，有限元分析法可以计算出结构各部位的应力、应变和位移分布，进而确定结构的倾覆临界状态和抗倾覆安全系数。与传统设计方法相比，有限元分析法能够更真实地反映水池结构的力学性能和地基与结构的相互作用，为水池结构的优化设计提供更准确的依据，但该方法对计算模型的建立和参数选取要求较高，计算过程复杂，需要专业的软件和技术人员支持^[2]。

可靠度设计法：可靠度设计法是一种基于概率理论的设计方法，考虑了荷载、材料性能和几何尺寸等因素的不确定性。该方法通过计算结构在规定时间内、规定条件下完成预定功能的概率，即结构的可靠度，来评价水池结构的抗倾覆稳定性。在可靠度设计中，将荷载和材料性能等参数视为随机变量，通过概率统计方法确定其分布特征，然后运用可靠度理论建立结构的极限状态方程，计算结构的失效概率或可靠指标。可靠度设计法能够定量地描述结构的可靠性，使设计结果更加科学合理，符合工程实际情况，但该方法需要大量的统计数据 and 复杂的计算过程，目前在实际工程中的应用还受到一定限制^[3]。

四、案例分析

(一) 工程概况

某水厂新建一座大型矩形水池，水池尺寸为50m×30m×6m（长×宽×高），采用钢筋混凝土结构，基础形式为筏板基础，基础厚度为1.2m。水池位于中等密实的粉质黏土地基上，地下水位埋深为3m。该地区的基本风压为0.45kN/m²，抗震设防烈度为7度。



图1 水池效果图

(二) 抗倾覆稳定性分析

传统设计方法分析：采用静力平衡法对该清水池进行抗倾覆稳定性分析。首先，计算各种荷载作用下产生的倾覆力矩和抗倾覆力矩。水压力产生的倾覆力矩根据三角形分布荷载公式计算，土压力采用朗肯土压力理论计算，风荷载按照《建筑结构荷载规范》计算，地震作用根据《构筑物抗震设计规范》计算。经计算，在正常使用工况下，倾覆力矩

$M_0=8500\text{kN}\cdot\text{m}$, 抗倾覆力矩 $M_r=15000\text{kN}\cdot\text{m}$, 抗倾覆安全系数 $K_t=M_0/M_r=8500/15000 \approx 1.76$, 满足允许抗倾覆安全系数 $[K_t]=1.5$ 的要求。

有限元分析法分析: 运用有限元软件对该清水池建立三维有限元模型, 考虑水池结构与地基的相互作用, 采用实体单元模拟水池结构和地基土体, 设置合理的边界条件和材料参数。对模型施加与传统设计方法相同的荷载工况, 进行非线性静力分析。计算结果表明, 水池结构在正常使用工况下, 最大应力和应变均在材料的允许范围内, 抗倾覆安全系数为 1.82, 与传统设计方法计算结果相近, 但有限元分析法能够更详细地展示结构各部位的受力和变形情况。

(三) 结果对比与分析

通过对传统设计方法和有限元分析法的计算结果进行对比, 可以发现两种方法计算得到的抗倾覆安全系数较为接近, 均能满足工程设计要求。传统设计方法计算简便, 能够快速得到抗倾覆稳定性的初步结果, 但无法准确反映结构的局部受力和变形情况; 有限元分析法虽然计算过程复杂, 但能够更真实地模拟水池结构的力学性能和地基与结构的相互作用, 为结构设计提供更详细的信息。在实际工程设计中, 可以结合两种方法的优点, 先用传统设计方法进行初步设计和验算, 再利用有限元分析法进行精细化分析和优化设计, 以确保水池结构的抗倾覆稳定性。

五、水厂水池结构抗倾覆稳定性设计优化措施

(一) 合理选择结构形式和尺寸

在水厂水池设计初期, 应根据工程地质条件、使用功能和荷载特点等因素, 合理选择水池的结构形式和尺寸。对于地质条件较差的地区, 可采用圆形水池结构, 因为圆形水池在水压力作用下受力较为均匀, 能够有效减小结构的倾覆力矩。同时, 适当增加水池的宽度和长度, 扩大基础底面积, 降低水池的重心位置, 以提高水池的抗倾覆稳定性。此外, 还可以通过设置扶壁柱、加强池壁厚度等措施, 增强水池结构的刚度和承载能力。

(二) 优化基础设计

基础是保证水池结构抗倾覆稳定性的关键部位, 应根据地基土的物理力学性质和水池结构的荷载特点, 优化基础设计。对于软弱地基, 可采用桩基础或复合地基等形式, 提高地基的承载能力和抗变形能力。在设计筏板基础时, 可通过调整筏板的厚度和配筋, 增强基础的整体性和抗倾覆能力。此外, 还可以在基础底面设置防滑齿槽或增加基础埋深, 以提高基础的抗滑移和抗倾覆性能。

(三) 考虑荷载组合与作用效应

在进行水厂水池结构抗倾覆稳定性设计时, 应充分

考虑各种荷载的组合情况和作用效应。合理确定荷载的取值和组合系数, 尤其是在地震、台风等极端工况下, 要加强对荷载作用效应的分析。对于水压力和土压力, 应根据水池的运行工况和土体的实际情况进行准确计算, 考虑水位变化和土体参数的不确定性对结构抗倾覆稳定性的影响。同时, 还应考虑温度变化、混凝土收缩徐变等因素对水池结构受力的影响, 采取相应的构造措施, 保证水池结构在各种工况下的抗倾覆稳定性。

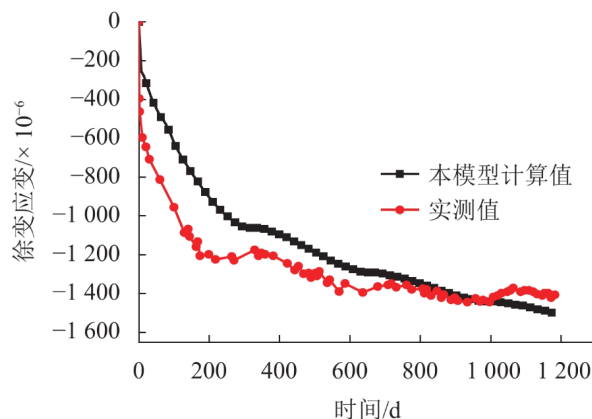


图 2 变温度环境下混凝土的三维收缩徐变效应

(四) 采用新型材料和技术

随着建筑材料和施工技术的不断发展, 在水厂水池结构设计中可以采用新型材料和技术来提高水池的抗倾覆稳定性。例如, 采用高性能混凝土, 提高水池结构的强度和耐久性; 使用新型复合材料, 减轻水池结构的自重, 降低重心位置。在施工技术方面, 可采用预应力技术, 增强水池结构的抗裂性能和承载能力; 运用 BIM 技术进行设计和施工管理, 实现对水池结构的精细化设计和施工过程的有效控制, 提高工程质量和抗倾覆稳定性。

结语

本文通过对水厂水池结构抗倾覆稳定性设计方法的研究, 系统分析了影响水池结构抗倾覆稳定性的荷载因素、结构因素和地质因素, 详细阐述了传统设计方法和现代设计方法的原理和应用, 并通过实际案例对比分析了不同设计方法的优缺点。同时, 提出了合理选择结构形式和尺寸、优化基础设计、考虑荷载组合与作用效应以及采用新型材料和技术等抗倾覆稳定性设计优化措施。研究成果为水厂水池结构抗倾覆稳定性设计提供了较为全面的理论和实践指导。

参考文献

- [1] 黄小达. 水厂水池结构设计要点 [J]. 山西建筑, 2021, 47(22): 43-45.
- [2] 燕家琪, 李川, 常伟. 污水厂构筑物水池结构的优化设计分析 [J]. 绿色环保建材, 2021, (06): 57-58.
- [3] 汤义波, 王学伟, 刘志远. 自来水厂清水池结构的施工技术与质量控制措施 [J]. 居舍, 2020, (27): 74-75.