

污水池改造修复中底板多工况分析与实例研究

唐晓虎¹, 曹智²

[1. 青岛市团岛污水处理厂, 山东 青岛 266002; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为解决局部改造引发的污水处理厂圆形水池结构泵房底板内力重分布的问题, 以青岛市某污水处理厂污水池改造工程为例, 采用整体建模的有限元方法, 系统分析了正常运行、事故高水位等多种工况下底板的内力变化特征。结果表明, 改造后底板的内力分布形态发生显著变化, 需依据各工况下的内力包络结果进行配筋优化, 并对原结构采取相应的加固措施。在施工过程中, 可采取实时监测与动态控制的手段, 确保实际作业中的结构受力与设计模型一致, 从而保障结构安全。工程实施效果良好, 验证了该方法的可靠性, 可为同类改造工程提供参考。

关键词: 水池; 改造; 底板; 多工况; 内力重分布

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0247-05

Multi-condition Analysis and Case Study of Bottom Slab in Renovation and Restoration of Sewage Tanks

TANG Xiaohu¹, CAO Zhi²

[1. Tuandao Wastewater Treatment Plant, Qingdao 266002, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To address the issue of internal force redistribution in the bottom slab of the circular water tank structure pump room in the wastewater treatment plant caused by partial renovation, taking the renovation project of sewage tank in a wastewater treatment plant in Qingdao as an example, the finite element method of overall modeling is used to systematically analyze the variation patterns of internal forces in the bottom slab under various operating conditions such as normal operation and high water level due to accidents. The results indicate that after the renovation, the internal force distribution pattern of the bottom slab has changed significantly, and reinforcement optimization needs to be carried out based on the envelope results of internal force under each operating condition, and the corresponding reinforcement measures should be taken for the original structure. During construction, the real-time monitoring and dynamic control can be adopted to ensure that the structural forces in the actual operation are consistent with the design model, thereby guaranteeing structural safety. The implementation effect of the project is good, verifying the reliability of this method and providing a reference for similar renovation projects.

Keywords: tank; renovation; bottom slab; multi-condition; internal force redistribution

0 引言

随着我国城镇化进程的深入及环境保护要求的持续提高, 污水处理厂的改造与扩建项目日益增多^[1-2]。近年来, 我国地下净水厂建设数量与规模已超过国外^[3], 污水池作为污水处理系统的关键构筑物, 在改造过程中的结构设计合理性, 直接影响整个

污水处理系统的运行稳定性与长期耐久性。

在污水处理厂污水池的结构设计中, 底板内力分布计算一直是重点与难点。底板作为承载上部荷载并与地基相互作用的基础构件, 承受着复杂、多变的荷载工况, 不同工况会导致底板内力发生重新分布。尤其是在弹性地基条件下, 底板的受力机制更加复杂, 传统简化的计算方法往往难以真实地反映其实际工作状态^[4-5]。近年来, 随着结构分析理论的发展及计算机技术的普及, 有限元分析方法针对此类问题提供了更为精确的解决方案, 它能够准确地揭示底板在不同荷载工况下的内力分布特征^[6-8]。

本文依托实际工程案例, 系统阐述了污水处理

收稿日期: 2026-01-13

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”项目(23DZ1203504)

作者简介: 唐晓虎(1978—), 男, 学士, 工程师, 从事水处理方向研究工作。

通信作者: 曹智(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事结构工程设计与研究工作。电子信箱: caozhi@smedi.com

厂污水池底板改造中结构受力的计算方法与分析思路,以期为同类改造工程提供参考。

1 工程概况

本文研究对象为青岛市某污水处理厂提标扩建工程中的1座进水泵房。该泵房为圆形钢筋混凝土水池结构,内径为25 m,外池壁厚度为0.7 m,底板厚度为0.7 m,埋深为10.6 m,池顶比室外地坪高出0.3 m。顶板上方局部设置1座半圆形屋顶框架和1座轻质板房。原结构采用沉井法施工,持力层为粉质黏土,地基承载力特征值 $f_{ak}=160$ kPa(未修正),且在泵房底板下设置了厚度为3 m的压密注浆加固层。

工程场地的抗震设防烈度为7度(0.1g),设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅱ类。结构抗震设防类别为重点设防类,抗震等级为三级。地基基础设计等级为丙级。场区地下水位标高位于室外地坪标高以下0.5 m。

原污水池为满足抗浮稳定要求,在内部2处空腔区域分别填筑了厚度为4 m的毛石混凝土作为压重(见图1)。

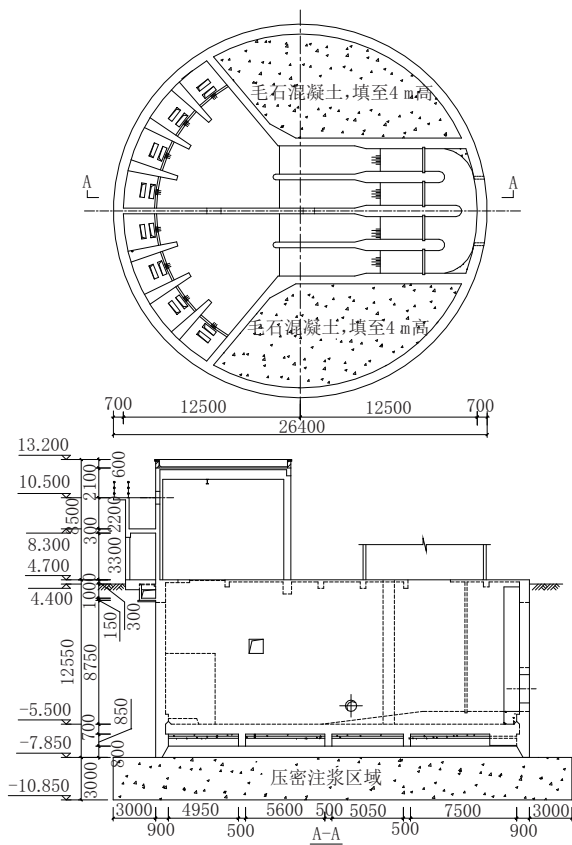


图1 原结构图(尺寸:mm,标高:m)

本次改造拟将原有2处空腔区域改建为新的出水泵房。具体改造内容如图2所示,改造内容包括:

拆除改造区域内原有配重毛石混凝土至底板面,采用植筋工艺连接并浇筑新的池壁等泵房结构。根据抗浮计算,其余空腔区域需浇筑厚度为4.5 m的素混凝土,以确保结构整体抗浮稳定。

在改造施工期间,除上述作业空腔外,污水池其余部分须始终保持正常满水运行。该措施既满足了厂区持续运营的需求,又为施工期提供了必要的抗浮压重。

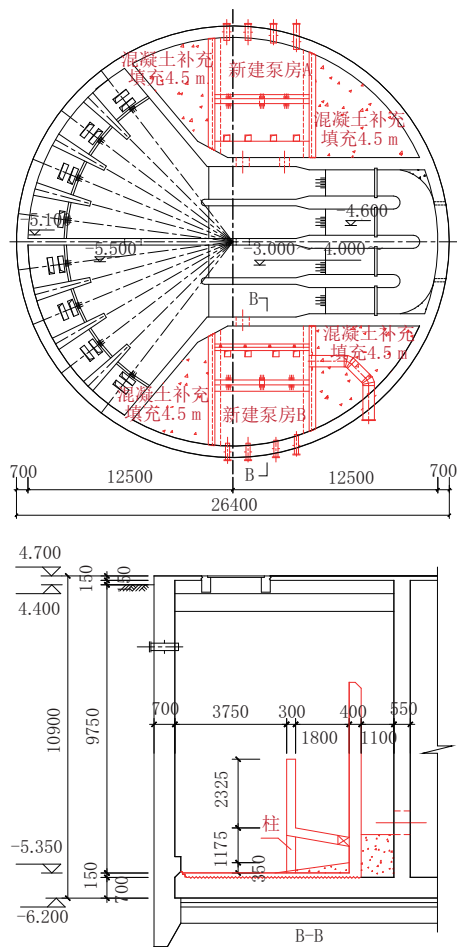


图2 结构改造图(尺寸:mm,标高:m)

2 工况分析

原污水池空腔区域设置了厚度为4 m的毛石混凝土配重,使得该处底板所受净反力较小。改造后,新建泵房区域的配重混凝土被拆除,而相邻空腔区域的配重混凝土则增厚至4.5 m,这将导致新建泵房内底板的基底净反力增大。因此,需对该处底板在不同可能工况下的受力情况进行复核。污水池内的液位在不同工况下存在波动,需对液位进行控制。污水池可能面临以下4种工况。

2.1 正常运行内水工况

污水池内1处新建泵房处于无水状态,其余池体

保持满水运行。本工况按水池正常运行最高液位 5 m 控制,验算该新建泵房底板的结构强度并按规范控制裂缝宽度。

2.2 事故高水位工况

发生事故时,污水池内水位升至溢流液位 6.6 m,水池内 1 处新建泵房处于无水状态,其余池体处于溢流状态。验算该新建泵房底板的结构强度,不控制裂缝。

2.3 排空水体检修工况

将污水池内的水体完全排空,此时室外的地下水位达到最高,需对新建泵房底板进行结构强度与裂缝控制验算。

2.4 施工清底工况

污水池除改造空腔区域外维持正常水位运行,池内液位控制在 2.5~5 m,既能利用水体配重实现结构抗浮,又可避免改造过程中池内荷载超限引发的水池承载力不足问题。新建泵房区域原有配重混凝土已被清除,可对底板结构强度和裂缝控制进行验算。

由于改造会导致底板受力发生复杂变化,因此,在改造过程中,需针对上述各类工况开展水池底板受力复核。

3 建模分析

在传统计算方法中,连接构件通常被简化为固定端或铰接支座,难以真实反映结构间的实际刚度分布情况,且易“夸大”应力集中效应,导致配筋设计偏于保守。针对污水池底板在多种工况下复杂的受力特征,本工程改造设计采用整体有限元方法进行建模分析^[9-14]。

借助 Autodesk Robot Structural Analysis Professional 软件,本文构建了精细化有限元模型(见图 3),具体过程如下。

3.1 结构建模

池壁、底板和渠道的数值模型采用壳单元,并严格按照实际尺寸建立;拉梁采用杆单元建模。

3.2 边界条件

在底板上设置单向弹性支撑,取基床系数 20 000 kN/m³,作为模拟地基的约束条件。

3.3 荷载施加

本文以正常运行内水工况为例,将该工况对应的荷载全部施加于模型(见图 4),主要的荷载包括:污水池正常运行时的内水荷载、水池顶板上的恒载

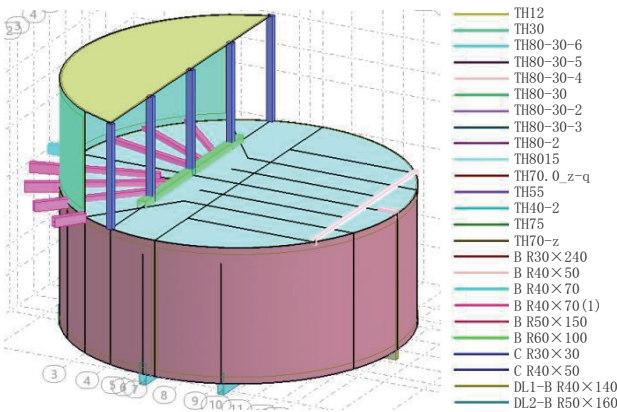


图 3 整体建模三维图

与活载、上部渠道按集中荷载形式施加于顶板悬挑梁上的荷载、屋面荷载。其余工况下的荷载,按照对应工况的规范要求取相应数值后施加^[15-16]。

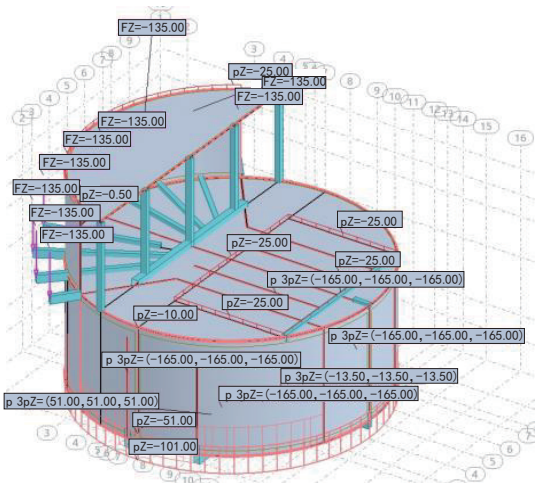


图 4 正常运行 p 工况下荷载布置图(集中力:kN,面荷载:kPa)

3.4 内力计算

以正常运行内水工况为例,底板在 X、Y 方向的弯矩云图如图 5 所示,其余工况下的内力分布结果按照对应工况的规范要求提取。

3.5 内力分布结果分析

对比各类工况下水池底板内力分布的结果,本文得出以下结论。

其一,在正常运行内水工况与事故高水位工况下,底板跨中处以及与现状池壁支座处产生的内力最大。由于前者尚需满足裂缝控制要求,两者实际的配筋需求较为相似。

其二,在排空水体检修的工况下,新建泵房区域的内力相对较小,但受改造区域荷载变化的影响,未改造区域底板的局部内力,相较于改造前的对应工况有所增大。但增幅有限,原配筋仍能满足要求。

其三,在施工清底工况下,空腔拆除区域与未拆除混凝土交界处的内力相对更大,该内力对该区域

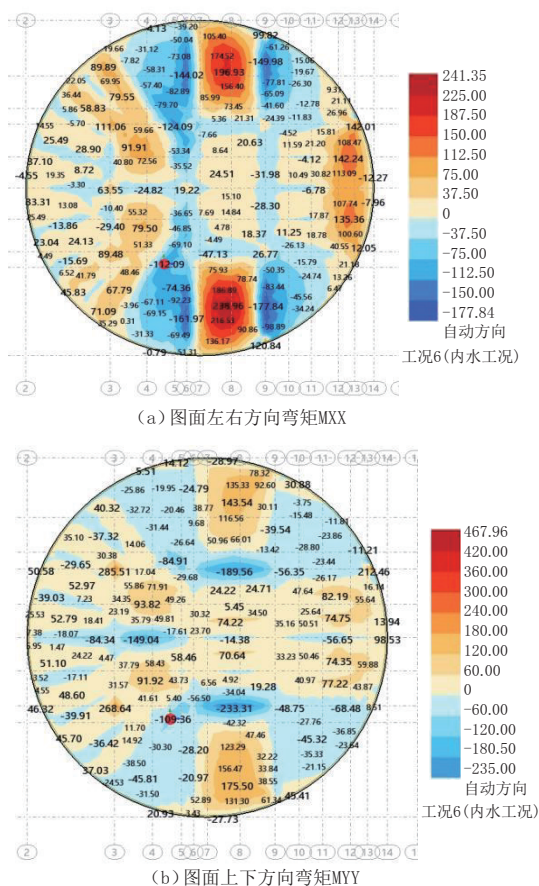


图5 内水工况下底板弯矩图(单位: kN·m/m)

的配筋起到控制作用。

3.6 原结构配筋复核与加固

经验算,在新的内力分布下,底板底部原配筋满足要求,2处新建泵房区域顶部配筋不足。处理措施:对底板顶部进行凿毛处理,并浇筑厚度为150 mm的加厚层,加铺双层双向钢筋C16@200,以满足板顶的受力要求。

4 现场实施

为确保改造过程中泵房结构整体的稳定性,并严格控制差异沉降,本工程严格按照设计模型设定的施工顺序与工艺要求,对2处空腔区域的改造作业实施全过程同步施工。

4.1 重点把控内容

一是控制非改造区域的池内液位,既方便利用水体配重实现结构抗浮,又可避免改造过程中池内荷载超限引发的水池承载力不足问题。

二是同步拆除2处改造泵房区域原有的配重混凝土、同步新建泵房池壁及上部结构、同步浇筑新增配重素混凝土。该同步施工策略旨在避免因两侧施工进度不一引发地基应力重分布不均,进而造成结

构内力、沉降分布不均的安全隐患。

4.2 监测措施

施工期间,同步实施多项监测措施,以保障结构安全与模型假设的有效性。

一是水位动态监测:对场地的地下水位和池内非空腔区域的运行水位进行实时监测,确保施工期间水池的抗浮稳定性符合设计要求。

二是沉降变形观测:在构筑物关键部位系统布置沉降观测点,形成变形监测网络,定期采集数据并与计算模型数据比对。

三是施工过程记录:全程跟踪并记录各施工环节的起止时间、材料强度和条件,确保实际施工条件与有限元模型中的假定条件基本一致。

现场施工情况如图6所示,通过严格的过程控制与实时反馈,本工程实现施工阶段的结构受力状态与设计模型高度吻合,有效保证了施工质量。



图6 泵房现场施工图

5 结论

本文基于实际改造工程,提出一种针对既有污水池底板结构改造的综合分析设计与施工控制方法,以期为同类改造工程提供参考。本文得出如下4点主要结论。

其一,在污水池改造设计中,底板的受力计算是其中的重点与难点,需对各种工况下底板的受力情况进行分析。例如,在本工程中,需对改造施工阶段的底板受力变化,以及改造后的正常运行内水工况、事故高水位工况、排空水体检修工况进行计算;并对各工况引起的内力分布取包络,对原结构的配筋开展复核。计算分析表明,污水池底板在不同工况下的受力状态存在显著差异。总体而言,底板内力改

变的原因是改造过程中不同工况下基底净反力发生变化,进而引起局部内力重分布。对于原结构中受力不满足规范要求处,需采取相应的加固措施。

其二,池内水位既要满足生产运营的要求,又要满足不同工况下结构承载力的要求,还要在施工阶段发挥抗浮配重的作用,因此,需在不同阶段控制池内水位。

其三,施工阶段的实施方式会直接影响结构的实际受力状态。施工阶段的结构受力状态,可能成为配筋设计的控制依据。结构改造设计必须分析施工阶段的结构受力特征。

其四,为保证实际结构受力与模型设计一致,施工过程中需严格控制作业顺序、荷载变化与边界条件。尤其是在边运行、边改造的水处理结构中,可以通过同步施工、实时监测与动态反馈的控制手段,确保施工过程中污水池的受力模式与设计假定基本一致,避免因施工偏差导致的结构安全隐患。

参考文献:

[1] 闫永超.构筑物水池结构改造设计探讨[J].特种结构,2017,34(1):31-35.
[2] 庄勇,魏常宝.污水处理厂水池改造与加固[J].特种结构,2018,35(6):46-52.

[3] 陈威,高明朗,黄育初,等.国内地下式污水处理厂的现状与发展[J].中国给水排水,2025,41(14):35-43.
[4] 张蜀沪,薛伟辰,王恒栋,等.水池结构与地基基础共同作用的研究进展[J].特种结构,2006,23(2):15-18.
[5] 王寿生.弹性地基上矩形水池结构计算的研究现状综述[J].特种结构,2012,29(2):23-31.
[6] 吴俊.水池底板在弹性地基条件下的内力研究[J].特种结构,2024,42(1):162-168.
[7] 张静,石江涛.大型钢筋混凝土水池分离法与共同作用法计算分析[J].特种结构,2024,41(4):7-12.
[8] 王晖.弹性地基上大型水池数值分析与比较[J].特种结构,2008,325(1):55-57.
[9] 给水排水工程结构设计手册编委会.给水排水工程结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
[10] CECS 138:2002 给水排水工程结构钢筋混凝土水池结构设计规程[S].
[11] 宣锋.给排水工程水池结构三维与二维计算结果对比探析[J].特种结构,2014,31(6):35-49.
[12] 朱清元.钢筋混凝土水池的有限元算法与手册算法比较[J].特种结构,2016,33(1):29-43.
[13] 郑国洪,解永翠,鲁德标,等.三维有限元计算在大型水池中的应用[J].云南水力发电,2016,32(3):59-60.
[14] 宋红玉,张东岩,韩天华.地基土的刚度对封闭水池内力的影响[J].特种结构,2010,27(5):43-45;52.
[15] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
[16] GB 55001—2021 工程结构通用规范[S].

(上接第 226 页)

刊2):14-17.
[4] 上海市排水管理事务中心.上海排水行业发展报告[R].2024.
[5] 张岩.上海中心城区城镇污水水质特性分析[J].净水技术,2023,42(11):101-111.
[6] 洗巍,樊雪莲,王建斌.超大型城市合流制污水处理系统水量动态变化研究[J].城市道桥与防洪,2024(3):98-102.
[7] 陈秀成,牛天浩.上海泰和全地下大型污水处理厂工艺设计要点及特点[J].中国给水排水,2021,37(10):83-88.
[8] 上海水务海洋.上海市再生水示范案例系列展示①——“内、中、外”三循环,海滨污水厂尾水 100% 再利用[EB/OL].(2023-08-31)[2026-01-07].https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_24438098.
[9] 房阔,王凯军.我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J].给水排水,2021,57(8):49-55.
[10] 陈蓉.城市视角下污水处理厂景观设计思考——以虹桥污水处

理厂景观设计为例[J].中外建筑,2019(3):141-143.
[11] 张涛,朱群志,姚博伟,等.上海地区污水源热泵制冷工况实验研究[J].上海电力学院学报,2017,33(5):434-438.
[12] 裘湛.污水源热泵发展现状及在上海的应用前景[J].城市道桥与防洪,2017(4):110-112;126.
[13] 上海水务海洋.上海市再生水示范案例系列展示⑥——虹桥污水处理厂:高温水源热泵在污泥干化环节中的应用[EB/OL].(2023-10-17)[2026-01-07].<http://www.water8848.com/news/202310/19/147726.html>.
[14] 上海水务海洋.上海市再生水示范案例系列展示②——蟠龙天地,“新天地”里的“新”河道[EB/OL].(2023-09-05)[2026-01-07].https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_24495617.
[15] 朱英杰,杨丹卉,周方鹤,等.污水制氢的现状与未来[J].环境工程,2024,42(9):13-28.