

基于三维单元折板沉淀池冻害及加固有限元分析

鲍利¹, 陈栋¹, 张建强¹, 陈志鸿¹, 周志宇², 李洁琳¹

(1. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东 济南 250000; 2. 山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为对某受冻害折板沉淀池选择合理的加固设计方案, 对其进行相关调查检测与有限元分析。通过检测得到裂缝的分布形态及钢筋和混凝土的相关参数; 分析结果表明, 混凝土质量的欠缺所带来的问题在水池遭遇冻害时可能会诱发危害结构的贯通性裂缝。通过三维有限单元对该水池进行建模并进行温度场-水压力作用耦合分析, 其结果能较好反映水池实际受损情况, 计算得到的损伤相较于实际情况偏大, 池壁在伸缩缝位置垂直于壁面的位移最大值在受冻害情况下显著大于常规工况。基于充分利用新浇筑混凝土材料强度与减少受损池壁拉应力的原则下, 对单侧加固与双侧加固两种加固措施进行有限元对比分析, 结果表明采用对受损墙体两侧同时设置板墙的双侧加固法可以起到更好的加固效果。

关键词: 矩形水池; 实体单元; 钢筋混凝土; 严寒天气; 水池加固; 裂缝

中图分类号: TU991.34

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0293-05

Finite Element Analysis on Freeze Injury and Reinforcement of Sedimentation Tank Based on Three-dimensional Finite Elements

BAO Li¹, CHEN Dong¹, ZHANG Jianqiang¹, CHEN Zhihong¹, ZHOU Zhiyu², LI Jielin¹

(1. Environmental Engineering Co., Ltd., of Shandong Academy of Environmental Science, Jinan 250000, China; 2. Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: In order to select an appropriate reinforcement design scheme for a frozen damaged folded-plate sedimentation tank, the relevant investigations, detection and finite element analysis on it are conducted. Through the detection, the distribution patterns of cracks and the relevant parameters of steel bars and concrete are obtained. The detection and analysis results indicate that the problems caused by the deficiency of concrete quality may induce the through cracks that harm the structure when the water tank is damaged by freezing. By modeling the water tank using three-dimensional finite element and conducting the analysis of the temperature field coupled with water pressure, the results can better reflect the actual damage of the water tank, but the calculated damage is relatively larger than the actual. The maximum displacement of the tank wall perpendicular to the wall surface at the expansion joint position is significantly greater than that under normal conditions when subjected to frost damage. Based on the principles of fully utilizing the strength of newly poured concrete materials and reducing the tensile stress on the damaged tank walls, a comparative finite element analysis is conducted on single-sided reinforcement and double-sided reinforcement methods. The results show that the double-sided reinforcement method of setting up panel walls on both sides of the damaged wall can achieve a better reinforcement effect.

Keywords: rectangular tank; solid element; reinforced concrete; severe cold weather; tank reinforcement; crack

0 引言

现阶段, 存在许多工业水池由于较长的服役时间或其他因素(混凝土碳化及钢筋锈蚀等)导致水池耐久性的降低, 此类水池急需相关的加固补强。另

外在国家相关政策影响下, 大量污水处理厂需通过提标改造达到相关排放标准, 提标改造过程中因工艺要求或其他原因提高水处理构筑物设计荷载, 该类水池同样需要进行加固改造以满足使用要求。

近年来全球因气候变化导致的次生灾害频发, 随着全球变暖趋势的增强, 极端天气出现的频率和强度也随之增加^[1-2]。我国幅员辽阔, 气候种类丰富, 因极端气候造成基础设施的破坏也不在少数。极端气候下的冻害是水处理构筑物面临的一项挑战, 对新建造水池的设计以及已有水池的防护均不

收稿日期: 2026-03-13

作者简介: 鲍利(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构设计工作。

通信作者: 陈栋(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构设计工作。电子邮箱: chendong200704005@163.com

能忽视其影响。

基于已有的相关研究,文献[3]采用壳体有限元分析对建造于伊拉克某矩形水池进行了分析并对有限元和手册计算结果进行了详细的对比分析,并指出了板件相互影响的效应和手册计算方法的不足;文献[4]采用有限元对某经过注浆加固后又再次渗漏的圆形水池进行分析并提出相关加固方法。文献[5]采用三维有限元对某复杂水池进行分析,建立了结构-地基整体模型,考虑了温度荷载和常规荷载的组合工况并进行相关计算;结果表明温度荷载对水池池壁的应力和位移影响较大。在其他学者相关研究中,使用有限元程序对水池进行受力计算^[6-7]及加固分析^[8]显示出其独特的优势,不同参数的水池加固方案可通过有限元程序建模分析并加以比选。本文对实际工程中遭受冻害影响的一座折板絮凝沉淀池进行了相关调查研究,通过三维实体有限元建模进行温度场与水压力作用下的计算,在此分析的基础上提出相应的加固方案并进行有限元模拟,验证加固方案的可靠性并比选最优方案,为水池的加固改造提供借鉴性思路。

1 工程概况

1.1 受损水池简介

研究对象选自山东某污水处理厂中的一座斜板絮凝沉淀池,结构形式为现浇不带顶盖矩形钢筋混凝土全地上水池,筏板顶面与场地地坪齐平,其尺寸见图1。水池沿长度方向设置一道伸缩缝,伸缩缝中采用橡胶止水带。水池池体混凝土设计强度等级为C30,钢筋设计强度等级为HRB335。受损渗漏的池壁主要为沿长度方向的池壁(CB-3),其配筋见图2。

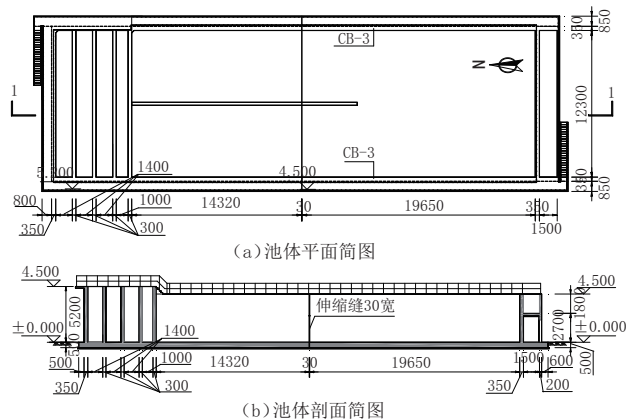


图1 水池简图(单位:mm)

1.2 冻害情况

本工程建造于2010年,至遭遇2021年1月份的

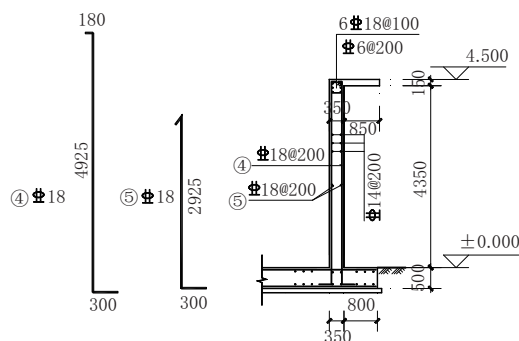


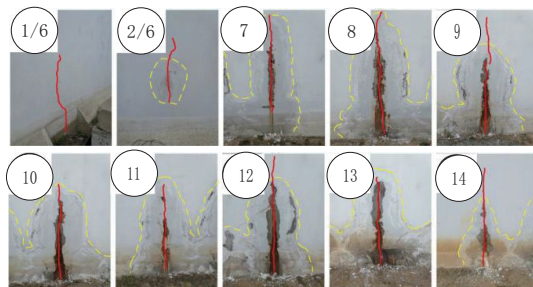
图2 CB-3配筋图(单位:mm)

寒潮袭击前均处于正常使用状态,寒潮袭击之后,水池内部运行温度大约为 5°C ,而水池外壁温度急剧降低至零下 18°C ,沉淀池部分墙体出现开裂渗漏现象,对其正常使用与结构耐久性产生了不利影响,因此对该池体进行现场实际调查并做相关检测与鉴定。内容主要集中于以下方面:裂缝(分布位置、长度、形态等),混凝土强度,碳化深度及局部裸露锈蚀钢筋实测直径。

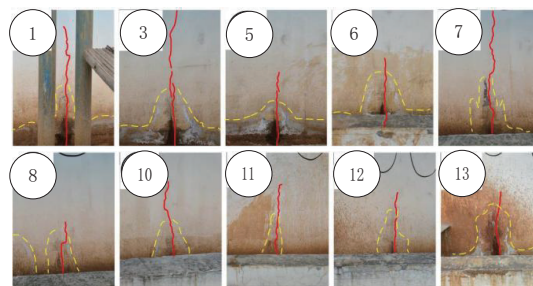
1.3 检测结果简述

1.3.1 水池裂缝分布

水池池壁的渗漏现象较为严重,经过现场调查标定的裂缝分布见图3(限于篇幅仅列出部分裂缝的照片):水池裂缝几乎全分布于长度最长的CB-3(单向板),裂缝开展方向平行于池壁高度方向,且于水池墙体的下半部分分布较多。



(a) 东侧池壁裂缝详图



(b) 西侧池壁裂缝详图

图3 裂缝详图

经调查,该沉淀池池壁外侧存在明显竖向裂缝,以东、西侧池壁数量较多且东侧多于西侧,裂缝延伸较长(多在2 m左右),空池状态下最大裂缝宽度为

0.40 mm,而有水情况下裂缝可达 0.45 mm,已明显超出水池正常使用裂缝限值;严重处裂缝周边表面混凝土已部分脱落。水池部分贯通裂缝对应池内壁钢筋锈蚀点位。该现象提示部分贯通裂缝是由于钢筋锈蚀点在严寒情况下诱发所致。南、北两侧池壁外侧病害特征较少,且检测时表面未见渗漏、泛碱现象,水池南侧墙体没有裂缝产生,故本文中不对其进行讨论。

1.3.2 混凝土强度及碳化检测

由于该沉淀池正在使用,为减少检测对其造成的损坏,依据《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2019)^[9]、《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)^[10],采用回弹法对该沉淀池混凝土构件的混凝土抗压强度进行随机抽查检测。经相关检测,除个别混凝土粉化区域混凝土强度等级为 C15 之外,水池混凝土的修正后的混凝土回弹强度判定为为 C20。

对混凝土碳化深度的检测结果表明:(1)池壁外:所抽检池壁外构件混凝土碳化深度均大于 6.0 mm(实测 32.0 mm);(2)池壁内:所抽检池壁内墙混凝土碳化深度为 5.0~6.0 mm。检测结果表明钢筋间距及保护层厚度基本满足相关规范要求。池壁内个别锈红区域因壁内钢筋锈蚀、膨胀鼓起导致,部分区域已露筋,钢筋表面锈蚀较严重。

1.3 检测结果分析

裂缝在该池体的下半部分分布较多的原因是墙体根部受到底板的约束且处于应力分布较大的位置,在水压力与温度应力联合作用下导致开裂。从裂缝的数量看,裂缝数量与池壁的长度呈现相关性。

混凝土检测的强度以及碳化结果表明混凝土的密实度欠佳,水池内部出现局部钢筋锈蚀点可能与此原因有关。水池内壁局部点位的钢筋锈蚀产物的膨胀对周围混凝土产生劈裂破坏,削弱混凝土截面有效尺寸,该类位置应力集中使得冻害情况下温度应力裂缝优先选择此类薄弱的截面出现;加之锈蚀削弱钢筋有效截面面积,减少两者之间共同的工作能力,在多重因素作用下形成裂缝并且贯通,导致水池局部出现较为严重的损伤。

2 有限元模型建立及分析

2.1 材料参数及建模方法

模型混凝土强度等级采用实测修正强度 C20。混凝土及钢筋的本构关系按《混凝土结构设计规范》

(GB 50010—2010)(2024 年版)^[11]选用,材料的热工参数选自《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)^[12]。有限元模型钢筋布置完全按照设计图纸进行,在验证相关实体有限元模型分析的有效性的基础上,建模及分析要点仍采用相同的方式^[13],模型采用单静水压力下的工况与静水压力及降温影响下的热-力耦合工况分别进行分析,其中单静水压力下的工况作为对照,静水压力加载方式详见文献^[14]。

2.2 有限元基本模型分析

采用实体单元建立矩形水池有限元基本模型,取该水池的主体部分(去掉悬挑水池、走道板等附件,平面示意图图 4)建立有限元模型并施加满池静水压力,计算结果采用提取单元节点法并通过单元的实际尺寸进行折算,转换为每米板带的荷载。现提取水池根部及角隅等有限元计算结果与设计手册受力表计算结果^[15]进行对比,其结果列于表 1。采用实体有限元的计算结果中池壁顶部较支的情况^[13]与本工程池壁顶部自由的情况类似:角隅位置的弯矩值显著偏小而跨中略有增大。

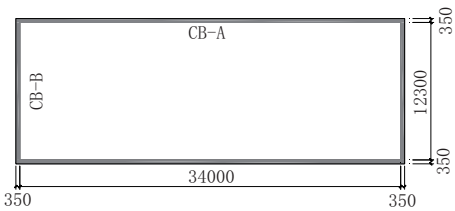


图 4 模型平面示意图(单位:mm)

表 1 计算结果对比		单位:kN·m					
类别	计算方法	M_x^0	M_y^0	M_{yz}^0	M_{0x}	M_x	M_y
CB-A (单向板)	有限元	—	150.3	94.77	—	—	—
	设计手册	—	151.9	85.11	—	—	—
CB-B (双向板)	有限元	-36.4	-101.4	-83.02	25.3	13.3	10.78
	设计手册	-48.27	-107.37	-70.57	22.33	10.08	5.76

2.2 有限元计算结果分析

水池有限元模型见图 5。分析表明,CB-3 沿伸缩缝位置垂直于墙面方向存在最大位移,在此列出位移与距池底板距离的曲线见图 6。在降温工况下的水池伸缩缝位置的板边位移相较于静水压力作用下有较大增长幅度。这可能与水池损伤产生的刚度退化及在此基础上的水池池体温度变形及有关。有限元计算结果显示水池池壁北侧角隅位置及水池走道板位置中部以及三个立面的角部出现高损伤区。图 7 表明水池模型壁板受拉损伤分布规律性与实际裂缝分布大致一致,有限元计算结果中水池东西两侧悬臂墙体的损伤基本对称。

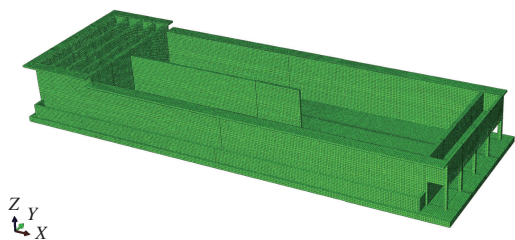


图5 水池有限元模型

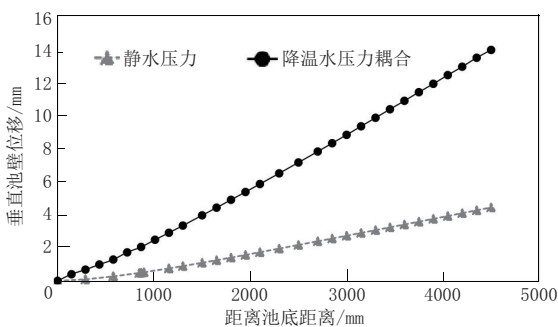


图6 位移对比图

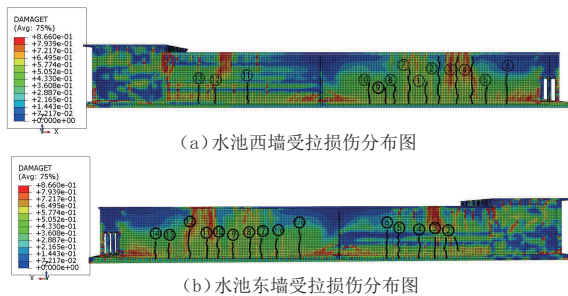


图7 水池受拉损伤分布图

3 不同加固方案有限元计算对比分析

3.1 水池加固方案

针对水池墙体厚度方向增设板墙进行加固。在加固之前对已有池体进行处理,措施如下:对钢筋锈蚀严重位置钢筋进行除锈,保护层开裂、脱落位置进行局部剔除,采用聚合物防水砂浆进行修补(加固方案2可不修补),对于裂缝采用压力注浆方式对裂缝进行填充堵漏,待养护完成后,采用增设板墙的方案进行整体加固。

加固方案简介如下:方案1为在水池外侧增设厚度为240 mm的钢筋混凝土板墙,双层双向配筋,配筋规格为C12@200 双层双向;方案2于水池内外各增设厚度为120 mm的单层配筋钢筋混凝土板墙,钢筋网为C12@200 双层双向,采用植筋或锚栓布置拉结连接件连接原有池壁与新增板墙。加固方案见图8。

3.2 水池加固有限元模型

加固板墙混凝土强度等级为C35,钢筋强度等级为HRB400。在有限元分析中新增设板墙与原有墙

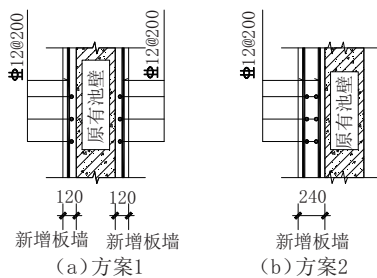


图8 混凝土墙体加固方案(单位:mm)

体采用Tie方式进行接触的模拟,新增板墙中的钢筋则采用Embedded方式嵌入原有池体与新增板墙。有限元模型见图9。

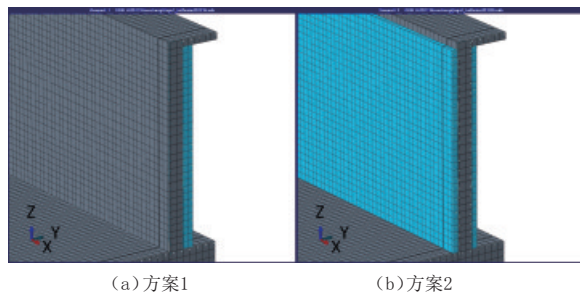


图9 加固方案有限元模型

损伤云图(见图10)结果表明:两种方案损伤因子均处于 10^{-2} 数量级,可认为损伤程度不显著,加固起到了显著作用;对于方案2,云图显示其损伤范围小于方案1。S33应力云图(见图11)表明,方案1的应力最大值为0.933 MPa(按检测推定强度等级C20,轴心抗拉强度设计值1.1 MPa,轴心抗拉强度标准值1.54 MPa),方案2为1.04 MPa,相较于方案1略高,但仍小于C35混凝土的轴心抗拉强度设计值(1.57 MPa)。水池池壁受拉区处于强度较高的新浇筑混凝土,能使原有池壁结构处于较小受拉应力的状态。综上所述认为加固方案2更具优势(见表2)。

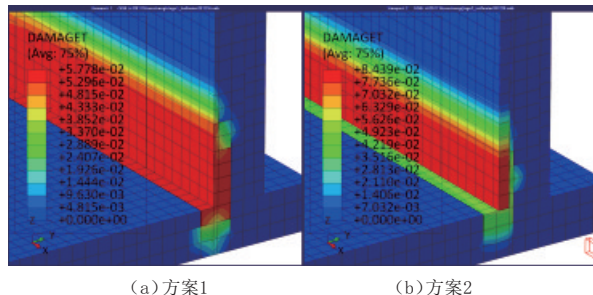


图10 损伤分布图

对于伸缩缝对水池池壁分割而影响壁板的受力边界条件的情况(例如伸缩缝两侧的壁板边缘形成悬臂板缺少侧向支承),在设计中建议在伸缩缝位置增设扶壁,用以增加板边的支承改善壁板的受力,这一举措也在有限元分析结果中得到验证。

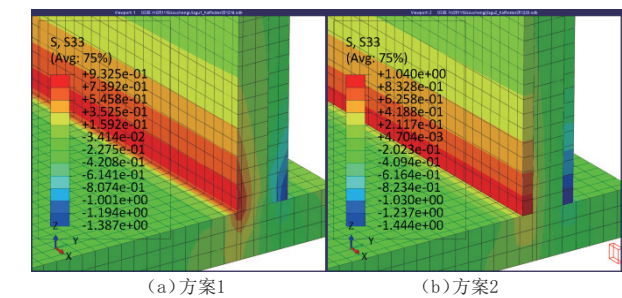


图 11 S33 主拉应力分布图

表 2 不同加固方案计算结果对比

方案类型	板边 Y 向位移最大值/mm	S ₃₃ 应力/MPa	损伤因子
方案 1	0.745 6	0.93 3	0.057 8
方案 2	0.744 3	1.04	0.084 4

4 结 论

(1)采用三维有限元对水池进行建模分析能较好预测在冻害情况下的水池裂缝分布,计算结果偏于保守;对不同结构类型的水池采用三维实体单元、壳单元与设计手册计算结果的差异仍需要更进一步的研究。

(2)同时受到冻害及内部水压力影响的斜板沉淀池的伸缩缝位置垂直于壁面的最大位移明显大于仅受水压力下的工况。在工程设计中,池壁伸缩缝位置宜设置扶壁用以改善壁板工作受力状态。

(3)实际冻害水池裂缝的形成位置可能受到多种因素影响。混凝土质量的缺陷会导致一系列耐久性问题,在遭遇寒潮袭击可能成为诱发池壁贯通裂缝形成的原因。

(4)对水池池壁采用板墙加固,建议将板墙布置

在拟加固墙体的两侧。该方案可以充分利用新浇筑混凝土的材料强度,减少原有池壁混凝土拉应力,有更好的加固效果。

参考文献:

[1] 邢嘉程,王依诺,关颖慧,等.1978—2020 年中国农业气象灾害时空格局解析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2025,55(6):9-20.

[2] 贾宏宇,肖楚照,康炜,等.极端气候下交通基础设施脆弱性研究综述[J].西南交通大学学报,2025,60(2):484-502.

[3] 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):29-33.

[4] 孙淑华,仲崇强,周扬帆,等.某圆形工业水池裂缝鉴定分析与处理[J].工程技术研究,2024,9(10):44-46.

[5] 欧泽锋.大直径圆形水池三维有限元应力-变形分析[J].广东水利水电,2024(1):44-50.

[6] 郭素娟,郭艳军.水池设计软件计算结果与手册查表计算结果比较[J].特种结构,2014,31(2):142-143.

[7] 王萱,赵星明,刘玉海.壁面温差对钢筋混凝土圆形水池池壁结构的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2015,46(5):740-743.

[8] 傅红.超长钢筋混凝土池壁裂缝机理分析及加固方案研究[D].西安:长安大学,2019.

[9] GB/T 50344—2019 建筑结构检测技术标准[S].

[10] JGJ/T 23—2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].

[11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范(2024年版)[S].

[12] GB 50176—2016 民用建筑热工设计规范[S].

[13] 陈栋,杨鑫欣,林宽,等.基于二维及三维单元有限元模型的污泥调理池力学性能分析[J].城市道桥与防洪,2025(3):252-256.

[14] 潘坚文.ABAQUS 水利工程应用实例教程[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[15] 沈世杰,王大龄,王长祥,等.给水排水工程结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.