

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.01.030

一种基于探地雷达等无损检测技术的污水处理设施混凝土顶板技术状况分级方法

史若昕, 樊俊江, 於林锋

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对污水处理设施混凝土构筑物经常出现较为严重的腐蚀破坏现象, 通过对上海市某污水处理厂混凝土进行非接触检测以及无损检测, 得到污水处理设施混凝土顶板剩余厚度和保护层剥落厚度, 结合实地测量结果验证了所开发的污水处理厂基础设施整体腐蚀程度检测技术的可靠性, 最终结合提出的技术状况分级方法和耐久性评定方法, 建立了污水处理设施混凝土构筑物检测评估标准化流程。对上海市某污水厂粗格栅和生物反应池廊道顶板进行试评价, 计算得出该污水厂地区混凝土顶板剩余服役寿命为 16.4 a, 按下一阶段的服役年限要求为 30 a 计算, 通过技术分级方法及耐久性评定方法可以得出: 下一目标使用年限内不满足耐久性要求, 应及时采取修复或其他提高耐久性的措施。

关键词: 污水处理设施; 混凝土腐蚀; 探地雷达; 水下机器人; 相控阵超声成像

中图分类号: TU528.72; P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2023)01-0201-06

A Technical Condition Classification Method for Concrete Roof of Sewage Treatment Facility Based on Nondestructive Testing

SHI Ruoxin, FAN Junjiang, YU Linfeng

(Shanghai Research Institute of Building Science Co., Ltd., Shanghai, 200032, China)

Abstract: Sewage treatment facilities concrete structures often appear more serious corrosion damage phenomenon, through non-contact testing and non-destructive testing of concrete in some wastewater treatment plants in Shanghai, the residual thickness of sewage and the thickness of the concrete top slab where the protective layer was peeling off were obtained, and the reliability of the overall corrosion detection technology of the infrastructure was verified through the field measurement results in conjunction with the development of wastewater treatment plants, and finally the classification method and durability evaluation method were proposed in conjunction with the technical conditions, and the concrete structure of wastewater treatment facilities was established standardized testing and evaluation process. After the test evaluation of the coarse grating and bioreactor gallery roof slab of a wastewater plant in Shanghai, the remaining service life of the concrete roof slab in the wastewater plant area was 16.4 years. Based on the next service life requirement of 30 years, conclusions could be drawn by the technical classification method and the durability evaluation method. If the durability requirement cannot be met within the next target service life, repair or other measures should be taken in time to improve the durability.

Keywords: sewage treatment facility; concrete corrosion; ground-penetrating radar; underwater robot; phased array ultrasonic imaging

近年来,上海市各污水处理厂多处钢筋混凝土出现严重的腐蚀^[1-2],不仅影响了污水厂正常运营,

还造成了不小的安全隐患。由于环保要求,污水厂混凝土构筑物在建造设计阶段大多采用全封闭式构

收稿日期:2022-10-03

修稿日期:2022-10-29

基金项目:上海市科技计划项目(21DZ1202805)

作者简介:史若昕(1993—),女,工程师,主要从事固废利用及混凝土材料等方面工作。E-mail:shiruoxin47@163.com

造,污水处理过程中产生的 H_2S 气体无法直接外排,导致污水处置设施中 H_2S 浓度较高,对混凝土构筑物产生较为严重的酸腐蚀破坏^[3-5],尤其是顶板区域,已出现了骨料裸露甚至钢筋外露锈蚀现象^[6-7]。若不及时跟踪检测,随着混凝土顶板的厚度不断腐蚀减薄,可能出现坍塌事故。对于污水厂清淤时人员可以进入的区域,可以直观看到混凝土顶板保护层及钢筋的腐蚀情况,但对于人员无法进入的区域,有必要通过合理的检测手段,对其混凝土顶板的强度、顶板厚度和顶板中钢筋保护层厚度等与结构安全性相关的参数进行检测,从而得知该区域混凝土顶板的腐蚀程度,以便及时采取有效的安全措施进行防护。迄今为止,相关技术标准及文献研究中尚未针对污水厂这一特殊服役环境下的混凝土腐蚀程度检测、等级评定等方面进行完整的研究和阐述,因此有必要建立一种污水处理设施混凝土结构顶板技术状况分级评定方法,以便及时发现问题,采取相应的修复手段,排除安全隐患。

本文以上海某城市污水处理厂为研究对象,基于开发的非接触检测技术和无损检测技术,结合提出的技术状况分级方法和耐久性评定方法,建立了污水处理设施混凝土构筑物检测评估标准化流程,从而形成了混凝土构筑物技术状况的明确划分,为相关技术人员和管理人员确定混凝土腐蚀状况提供判别依据。

1 污水厂基础设施混凝土构筑物整体腐蚀程度检测方法

1.1 利用水面漂浮机器人的非接触检测

长期以来,因为管道闭路电视检测(Closed Circuit Television Inspection, 简称 CCTV 检测)系统操作灵活,使用方便,技术也已经相当成熟,被检测单位广泛地应用到污水排水管道的检测工作。然而,CCTV 只能用于无水的管道或管道中水位较浅,不妨碍检测车行走的情况。对于除管道以外的污水处理设施,如进水泵房、粗格栅、沉砂池等,由于运营过程中有水流存在,水位较高,不可能停止运转后将水排尽后再进行检测。水面漂浮机器人是在 CCTV 测试原理基础上,通过利用搭载摄像头对暗部混凝土的侧壁和顶板混凝土腐蚀情况进行拍照和视频摄像,实现大水流条件下暗部混凝土的腐蚀情况的清晰观测,可以顺着水流漂浮、定位,然后进行作业、摄像,并且具有下观测角度大、图像清晰、拍摄距离长等优点,是用于污水混凝土构筑物的耐久性评定的

重要测试手段^[8-11]。

该检测方法是將水面漂浮机器人放入池内污水中,通过控制机器人向前、向后、转动或下潜,机器人上携带的自带 LED 光源高清摄像头实时将录像上传至控制箱内的显示屏上,对准上方混凝土顶板进行近距离摄像检测,从而直观地看到混凝土顶板受腐蚀面的腐蚀情况。

1.2 利用探地雷达的混凝土顶板剩余厚度无损检测

探地雷达作为常用的无损检测技术,其效率高、精度高,在交通路基路面检测、水工工程检测等工程领域内被广泛的运用^[12-17]。其原理是通过天线向介质发射高频电磁波,电磁波在介质中沿特定的方向传播,当遇到介电常数不同的分界面时或目标物发生反射,由介质表面的接收天线接收,根据接收到雷达波的波形,振幅强度和随时间变化特征推测界面和目的物,确定界面和目的物的位置和深度。

2 污水处理厂基础设施混凝土顶板技术状况分级方法

2.1 污水处理设施混凝土顶板技术状况分级评定方法

建立一种污水处理设施混凝土结构顶板技术状况分级评定方法,包括以下步骤:(1)采用水面漂浮机器人,对污水处理设施混凝土结构顶板的腐蚀面腐蚀情况进行摄像检查;(2)采用探地雷达对污水处理设施混凝土结构顶板当前厚度进行无损检测;(3)调取污水处理设施混凝土结构顶板图纸获取顶板的初始厚度、受腐蚀面的初始钢筋保护层厚度和服役年限;(4)确定顶板腐蚀剥落厚度和剩余保护层厚度;其中,顶板腐蚀剥落厚度为顶板初始厚度与探地雷达测得的混凝土结构顶板当前厚度的差值。剩余保护层厚度为受腐蚀面初始保护层厚度与顶板腐蚀剥落厚度的差值,当水面漂浮机器人摄像检查发现钢筋外露时,剩余保护层厚度为 0;(5)根据顶板腐蚀面腐蚀情况和剩余保护层厚度与初始保护层厚度比值对顶板技术状况进行分级;根据腐蚀面的腐蚀情况,将顶板技术状况分为五级:一级:防护涂层未剥落,混凝土表面状态完好;该等级技术状况基本对应全新状态,涂层未受到损伤剥落,混凝土也尚未因酸性腐蚀环境产生剥落。二级:防护涂层有破损,混凝土表面出现轻度粉化,对混凝土结构使用功能无影响;该等级技术状况对应带涂层的混凝土防护涂层因为酸性腐蚀环境出现了老化剥落,裸露的

混凝土尚未因 H_2S 酸性腐蚀而产生明显的破坏。三级:防护涂层完全剥落,混凝土表面出现中度粉化剥落,尚能维持正常使用功能;该等级技术状况对应涂层已经彻底失效,混凝土也因为酸性腐蚀开始出现了粉化剥落的情况,但仅限于非常浅层的混凝土剥落,没有出现明显的骨料裸露,因而保护层厚度的损失也较小,通常不会影响混凝土的正常使用功能。四级:混凝土表面出现明显剥落,粗骨料大面积裸露,不能保证正常使用;该等级技术状况对应混凝土构筑物经过一定运营期(如封闭条件下服役 5 a~10 a)腐蚀剥落的情况较为严重,保护层厚度损失严

重,粗骨料出现了大面积的裸露,无法确定是否能正常使用,需通过剩余厚度检测手段,结合结构承载力来辅助判别是否需要修复。五级:表层钢筋混凝土保护层完全剥落,钢筋外露锈蚀,不能正常使用,混凝土结构处于危险状态;该等级技术状况对应混凝土构筑物经过长期运营(如封闭条件下服役 15 a 以上),混凝土表面的保护层已经完全剥落,钢筋外露锈蚀,导致混凝土结构出现显著的劣化。

污水混凝土构筑物的一级到五级典型技术状况见图 1。



图 1 不同技术状况混凝土构筑物外观

此外,对于技术状况评定为四级的顶板,通过混凝土剩余厚度检测,并根据剩余保护层厚度与初始保护层厚度的比值来对四级技术状况,进一步细分为三级:a)4-a级:剩余保护层厚度/初始钢筋保护层厚度 $< 1/3$,顶板腐蚀剥落程度较轻;b)4-b级: $1/3 \leq$ 剩余保护层厚度/初始钢筋保护层厚度 $< 2/3$,顶板腐蚀剥落程度中等,应密切关注混凝土结构的承载能力;c)4-c级:剩余保护层厚度/初始钢筋保护层厚度 $\geq 2/3$,顶板剥落较为严重,应及时进行混凝土结构的承载能力验算。

(5)对于特定技术状况等级(即四级)的混凝土顶板,按下列步骤进行耐久性评定:1)根据顶板腐蚀剥落厚度和服役年限,确定顶板平均每年的腐蚀剥落厚度;2)根据顶板剩余保护层厚度,确定顶板剩余服役年限;3)设计顶板下一阶段目标服役年限;4)依据混凝土剩余使用年限预测值 t_{re} 、下一目标使用年限 t_c 和结构及构件耐久性重要性系数 γ_0 ,通过下列公式进行计算(其中 γ_0 按表 1 确定):

$$\beta = \frac{t_{re}}{(t_c \gamma_0)}$$

通过 β 值的大小对顶板的耐久性进行分级,并提出修复建议。其耐久性等级具体分级方法如下:

I 级: $\beta \geq 1.5$, 下一目标使用年限内满足耐久性要求,可不采取修复或其他提高耐久性的措施; II 级: $1 \leq \beta < 1.5$, 下一目标使用年限内基本满足耐久性要求,可视具体情况不采取、部分采取修复或其他提高耐久性措施; III 级: $\beta < 1$, 下一目标使用年限内不满足耐久性要求,应及时采取修复或其他提高耐久性的措施。

表 1 结构及构件耐久重要性系数 γ_0

耐久重要性等级	耐久性失效的影响	γ_0
I 级	有耐久性影响及不易重复修复的重要结构	1.1
II 级	有较大影响或较易修复、替换的一般结构	1.0
III 级	影响较小的次要结构	0.9

2.2 技术状态分级评定示例

以上海市某污水处理设施为研究对象,使用建立的污水处理设施混凝土结构顶板技术状况分级评定方法对该污水处理设施内的两处混凝土构筑物进行试评估,同时对几种检测方法的准确性进行验证。

2.2.1 生物反应池廊道

利用水面漂浮机器人非接触检测方式对生物反应池廊道内部混凝土结构的腐蚀情况进行近距离摄像检测,本次检测采用 X5 - HR4 全地形管道水面漂浮机器人,检测地点为生物反应池廊道区域 a,其检测结果如图 2 所示。

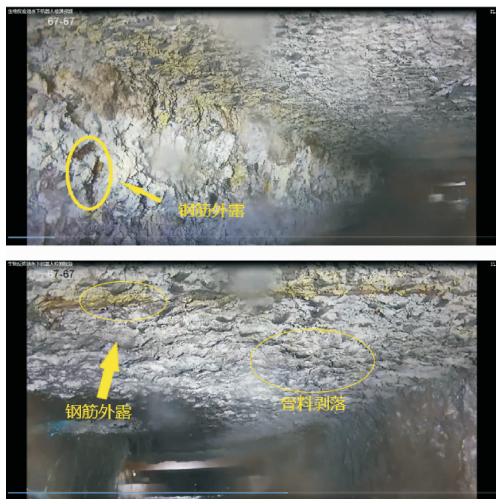


图 2 生物反应池廊道内部混凝土结构腐蚀情况

可以从拍摄的图片清楚的看出,廊道内部的混凝土侧壁腐蚀严重,混凝土顶板的防腐涂层已经被腐蚀剥落,并且某些地方的混凝土顶板和墙壁已经

有严重的骨料外露现象,钢筋也已经露出,说明该区域的腐蚀情况已经较为严重。根据本项目提出的污水混凝土构筑物技术状况分级方法,混凝土出现钢筋锈蚀达到五级技术状况,此时结构已处于危险状态,应进行系统性的结构分析来验证混凝土构筑物的结构安全性。

此外,为了验证探地雷达检测结果的准确性,还使用了 GSSI 公司生产的 SIR-4000 型探地雷达对同样属于生物反应池廊道的区域 b 的两个测区 b1、b2 进行混凝土顶板剩余厚度检测。测试前把测试区域表面清理干净,并且在测试前对各设备进行检查,确保都处于正常状态。为提高测试的准确度,测试时采用 2000 M 雷达天线,并在测量时确保天线与混凝土顶板上表面贴紧,移动检测天线时应保持平稳、速度均匀,速度控制在 3 km/h ~ 5 km/h 的范围内。

将测区得到的每组数据的算术平均值定义为混凝土顶板剩余厚度,两测区的剩余厚度结果如表 2 中所示。

表 2 测区 b1 和 b2 的混凝土顶板剩余厚度测试结果

区域	该测区剩余厚度/cm
b1	14.14
b2	13.06

测区 b1 与 b2 均为生物反应池廊道区域 b 内的同一片混凝土顶板,并且仅由一块金属盖板相隔开,理论上两块区域的剩余顶板厚度相近,但测区 b2 处有一根黑色排水管,因此该测区内部污水量较大,水流相比测区 b1 较快,并且污水排放时会对混凝土顶板及内部具有一定的冲刷作用,内部硫化氢浓度也应较高一些,故探地雷达测试结果 b2 的混凝土顶板剩余厚度比 b1 的薄 1.08 cm,这也进一步说明测区 b2 处的腐蚀程度比 b1 的更严重一些。

2.2.2 粗格栅

依旧采用 X5 - HR4 全地形管道水面漂浮机器人对粗格栅内部混凝土结构的腐蚀情况进行近距离摄像检测,其检测结果如图 3 所示。

可以从拍摄的图片清楚的看出,粗格栅内部的混凝土顶板表面出现明显剥落,粗骨料大面积裸露,根据本项目提出的污水混凝土构筑物技术状况分级方法,混凝土出现钢筋锈蚀达到四级技术状况,此时无法确定是否能正常使用,需通过剩余厚度检测手段,结合结构承载力来辅助判别是否需要修复。



图 3 粗格栅内部混凝土结构腐蚀情况

依旧使用了 GSSI 公司生产的 SIR-4000 型探地雷达对粗格栅的测区前池、后池和中间过道进行

测试,将每组数据的算术平均值定义为该测区混凝土顶板剩余厚度。因此,三个区域的剩余厚度结果如表 3 所示。

表 3 后池、中间过道和前池的混凝土顶板剩余厚度测试结果

区域	该测区剩余厚度/cm
后池	17.76
中间过道	17.66
前池	16.44

由于后池、前池和中间过道所在区域污水处理工艺的差别,因此承受的腐蚀程度也有差别,同时在考虑测量误差的情况下,可判断粗格栅处的混凝土剩余顶板厚度在 16 cm~17 cm 左右。

该污水处理设施的粗格栅建于 2001 年,根据粗格栅设计图纸(见图 4),粗格栅前池和后池顶板的初始厚度为 200 mm。

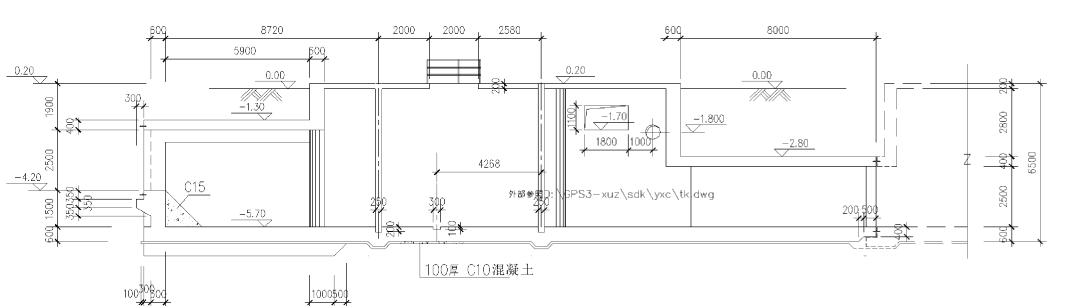


图 4 粗格栅设计图

通过水面漂浮机器人的检测,粗格栅顶板出现了大幅度面积的骨料裸露,混凝土构筑物的腐蚀状态属于四级技术状况。通过探地雷达测得前池的剩余厚度为 178 mm,已经腐蚀剥落的混凝土厚度为 22 mm,粗格栅已服役 20 a,计算得到实际平均腐蚀剥落速率为 1.1 mm/a。由设计图纸可知,前池混凝土顶板的初始保护层厚度为 40 mm,则顶板的剩余钢筋保护层厚度为 18 mm,已腐蚀保护层厚度与初始保护层厚度的比值为 0.55,属于 4-b 级技术状况,需要密切关注混凝土结构的安全性。

该污水厂混凝土构筑物始建于 2001 年,至今已服役 20 a,按 1.1 mm/a 的腐蚀剥落速率,剩余服役寿命为 16.4 a。按设计使用年限为 50 a 计算,下一阶段的服役年限要求为 30 a, $\beta = t_{re}/(t_c \gamma_0) = 16.4/(30 \times 1.1) = 0.50$,耐久性评定为 III 级:下一目标使用年限内不满足耐久性要求,应及时采取修复或其他提高耐久性的措施。

2.2.3 混凝土顶板剩余厚度测试准确性分析

在使用探地雷达法对上海市某污水处理厂粗格栅、生物反应池廊道进行混凝土顶板剩余厚度检测,总结以上测试结果如表 4 所示。

表 4 探地雷达法粗格栅及生物反应池廊道混凝土顶板剩余厚度测试结果

测试地点	顶板剩余厚度/cm
生物反应池廊道 b	13~14
粗格栅前池、后池、中间过道	16~17

使用卷尺在生物反应池廊道区域 b 以及粗格栅前池对可见的混凝土顶板进行了厚度测量,结果如图 5 所示。

可以看出,粗格栅前池的混凝土顶板经测试厚度约为 16 cm,与探地雷达测试结果接近,说明探地雷达可以较为精准的测出池内混凝土顶板的剩余厚度。对于生物反应池廊道区域 b 附近的混凝土底板

经测试厚度为 15 cm, 与该地区探地雷达测试结果接近, 再次证明采用的探地雷达无损检测的方法精确度较高, 数据具有一定的可信性。



图 5 生物反应池廊道及粗格栅前池的混凝土顶板厚度测量

图 5 生物反应池廊道及粗格栅前池的混凝土顶板厚度测量

总体来看, 综合非接触检测方法和无损检测方法可以对污水处理设施混凝土构筑物的总体腐蚀情况以及腐蚀的程度有较为宏观且准确的表征, 可以作为后续技术状况分级和耐久性评定的依据。

3 结 论

(1) 将开发的基于水面漂浮机器人的非接触检测技术与基于探地雷达的无损检测技术, 用于上海某城市污水厂粗格栅和生物反应池廊道顶板混凝土检测, 准确观测到混凝土顶板现如今的腐蚀状态, 并通过检测得到顶板剩余厚度和保护层剥落厚度。

(2) 根据非接触检测和无损检测得到涂层和混凝土腐蚀剥落程度, 以及钢筋是否外露, 将混凝土污水处理设施混凝土构筑物的技术状况分为 5 个级别, 从而形成了混凝土构筑物技术状况的量化划分, 为相关技术人员和管理人员确定混凝土腐蚀状况提供了一种判别依据。

(3) 建立了污水处理设施混凝土构筑物检测评估标准化流程, 以上海市某污水厂为对象进行试评价, 结果表明该厂内生物池反应廊道达到五级技术状况, 结构处于危险状态, 应进行系统的结构分析进行安全性验证; 粗格栅前池处于四级技术状况, 剩余服役寿命为 16.4 a, 耐久性评定为 III 级, 应及时采取修复或其他提高耐久性的措施。

参考文献:

- [1] 韩静云, 张小伟, 田永静, 等. 污水处理系统中混凝土结构的腐蚀现状调查及分析[J]. 混凝土, 2000(9): 52-54, 63.
- [2] 陈进, 李建军, 闻宝联. 城市污水处理构筑物钢筋混凝土腐蚀研究[J]. 科技资讯, 2008(8): 86-87.
- [3] 闻宝联. 城市污水环境下混凝土腐蚀及耐久性研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [4] 韩静云, 田永静, 陈忠汉. 污水中好氧菌对混凝土排污水管壁腐蚀的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(3): 23-25.
- [5] 刘文来. 城市污水处理构筑物钢筋混凝土结构的腐蚀及防护[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(1): 80-81.
- [6] Foorginezhad Sahar, Mohsehi-Dargah Masoud, Firoozirad Khadijeh, et al. Recent advances in sensing and assessment of corrosion in sewage pipelines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 147: 192-213.
- [7] 包昕. 污水环境下混凝土的劣化行为及预测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [8] 李永龙, 王皓冉, 张华. 水下机器人在水利水电工程检测中的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 586-590.
- [9] 郑发顺. 遥控水下机器人系统在水库大坝水下检查中的应用[J]. 水利信息化, 2014(2): 45-49.
- [10] 干佳馨, 陈擎环. 水下机器人在水利工程管理中的应用[J]. 科学技术创新, 2021(30): 10-12.
- [11] 沈清华, 杨青, 朱长富. 基于水下机器人的水下构筑物应急检测方法[J]. 测绘通报, 2021(S2): 145-148.
- [12] 范亚男. 地下管线探测中探地雷达技术应用研究[J]. 测绘通报, 2015(S1): 46-48, 53.
- [13] 叶超强, 刘斌清, 禚炜安, 等. 探地雷达技术在公路工程中的应用综述[J]. 西部交通科技, 2018(6): 38-40, 105.
- [14] 陈义群, 肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报, 2005(2): 149-155.
- [15] 白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 527-531.
- [16] 李嘉, 郭成超, 王复明, 等. 探地雷达应用概述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 629-637.
- [17] 谢昭晖, 李金铭. 我国探地雷达的应用现状及展望[J]. 工程勘察, 2007(11): 71-75.