

氯盐环境下钢筋混凝土水池等结构的防腐方法

吴禾佳¹ 孔祥利¹ 刘志刚¹ 高健²

(1. 中国市政工程东北设计研究院 长春 130021; 2. 尚志市自来水公司 150600)

(1. China Northeast Municipal Engineering Design and Research

Institute, Changchun 130021; 2. Shangzhi Water Supply Company, 150600)

[摘要] 修建在沿海一带污水处理厂的建(构筑物)不仅受到污水的腐蚀,还要受到含有氯盐的土壤、地下水的腐蚀。本文借鉴了美国污水处理池在防腐方面的设计方法,介绍了在沿海一带污水池的防腐设计中应注意的问题。

[关键词] 钢筋混凝土水池 污水处理 腐蚀 耐久性

ABSTRACT: The structures built in sea area will be corroded by not only wastewater, groundwater but also soil with chlorine. The article begins with some methods introduction of structures anti-corrosion in the USA. And then some methods have been given for water tanks designed in sea area for its durability.

KEYWORDS: Reinforced concrete tank Wastewater treatment Chloride corrosion Durability

1 氯盐环境下混凝土工程破坏概述

长期以来,人们一直以为混凝土是非常耐久的材料,直到 70 年代末期,发达国家才逐渐发现以前建成的基础设施工程在一些环境下出现了过



图1 密西西比河上某桥的垮塌

早的损坏。美国许多城市的混凝土基础设施工程和港口工程建成后不到 20、30 年甚至在更短的时间内就出现劣化,据 1998 年美国土木工程学会的一份材料估计,其需要有 1.3 万亿美元来处理美国国内基础设施工程存在的问题,仅修理与更换公路桥梁的混凝土桥面板一项就需 800 亿美元。另有资料指出,美国因除冰盐引起钢筋锈蚀需限载通行的公路桥梁已占这一环境下桥梁的 1/4。图 1 所示为 2007 年 8 月 1 日,美国明尼苏达州密西西比河上一座桥梁垮塌的情况。

前几年,我国遭受盐冻侵蚀地区的公路桥梁在耐久性设计方面仍没有明确要求(公路设计方面现在有了,而我国在水池耐久性方面仍没有明确的设计要求),对混凝土保护层和强度的要求仅为 25mm 与 C25,与加拿大 50 年代的设计水准一致。国内按这种标准设计的一座大桥,建成后仅 8 年,由于盐冻侵蚀,现已不得不部分拆除重建。同样,北京某立交桥也仅仅使用了 19 年,不得不部分拆除重建。长春的某立交桥 1988 年建成,同样由于盐冻侵蚀,桥面拦板现在(仅仅使用了 19

年)也不得不拆除重建。盐冻也对混凝土路面造成伤害,如东北地区的一条高等级公路只经过一个冬天就大面积剥蚀。

我国铁路隧道用低强度的 C15 混凝土作衬砌材料,密实度和抗渗性差,受到地下水与机车废气侵蚀,开裂与渗漏严重;对几个路局所辖的隧道进行抽样调查表明,漏水的占 50.4%,其中 1/3 渗漏严重,并导致钢轨等配件锈蚀以及电力牵引地段漏电,影响正常运行。如京广铁路运输大动脉上某加冰台,建于 1989 年,因未采取有效的钢筋锈蚀防护措施,遭受工业用盐 10 余年的腐蚀后,于 2001 年 10 月被拆除重建;湖北省某大桥也是由于腐蚀问题,仅仅使用了 5 年就拆除重建了。这样的例子有很多。

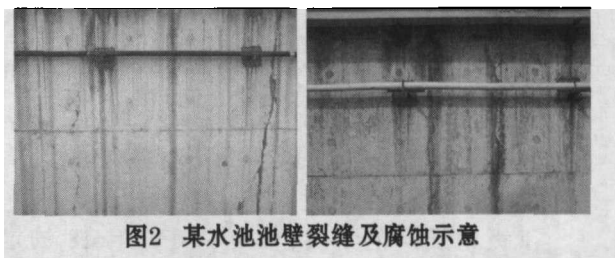


图2 某水池池壁裂缝及腐蚀示意

我国的污水处理工程大部分都是最近几年建成的,腐蚀现象还没有大面积表现出来。但是水池的耐久性不足的问题在个别地区已有发现,如某地的污水池,1998 年建成,2000 年 1 月份前后水池池壁出现了多道竖向、斜向裂缝,而且是通缝(图 2)。我们知道,钢筋锈蚀以后,其体积要膨胀 2.5~3 倍。因此,在水池裂缝处将会造成钢筋保护层脱落,进而加快水池的腐蚀。

由于我国最近几年工业发展很快,污染也成加重的趋势。据世界卫生组织的一项调查,世界上 20 个污染最严重的城市当中,中国占了 16 个。因此,我国的环保事业还有很大的发展潜力。



图3 东北某地水池因冻害造成的破坏示意

由于我国混凝土工程中的钢筋锈蚀和混凝土腐蚀严重,混凝土工程的耐久性设计对当前我国正在进行的大规模污水处理工程的建设具有重要战略意义和相当的紧迫性,如果再不积极采取相应对策并尽快落实具体措施,那么每年投入土建工程建设的庞大资金将会蒙受重大损失,资源也将遭受极大的浪费,建成后的工程将难以发挥长期效益,而在使用过程中频繁的修补乃至事故又必将影响正常的生产。

2 美国城市污水水池结构的防腐方法

2.1 城市污水水池结构的防腐方法

在美国(参见 ACI Use of fly Ash in Concrete, Reported by ACI Committee 232),对于一般的城市污水水池防腐,主要通过混凝土中添加 F 级粉煤灰和使用高效减水剂来完成。对于腐蚀性较大的城市污水(如印染、造纸等工业污水)除添加 F 级粉煤灰和使用高效减水剂外,还要添加一定量的硅粉。由于不同的粉煤灰性质不完全相同,所以 F 级粉煤灰的添加量也不可能是个固定值,一般为水泥重量的 15% ~ 35%。但对于大体积混凝土,为了减少由于水化热过高而产生的裂缝、抵抗硫酸盐腐蚀或减少由于碱骨料反应而产生的膨胀,也可以使用大掺量的粉煤灰,这些都是被证明了的、行之有效的方法。

F 级粉煤灰的定义,根据 ASTM C 618 的定义:发电厂燃烧无烟煤或烟煤(含沥青)而产生的副产品,根据化学成份分析, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 的总含量应至少在 70% 以上,这种粉煤灰具有更强的水泥硬结作用。

在美国还有一种粉煤灰,叫 C 级粉煤灰。它是发电厂燃烧褐煤或次等的烟煤(含沥青)而产生的副产品,根据化学成分分析, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 的总含量应至少在 50% 以上,但 CaO 的成份为

10% ~ 35%。

在我国,对于粉煤灰的划分是通过细度、烧失量、含水率等物理指标来划分的,分为一、二、三级粉煤灰,不尽科学。只能认为粉煤灰越细其水化作用越强(实际上是 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 的含量越大,其水化作用越强)。另外,我国对粉煤灰的收缩率没有规定,美国规定粉煤灰与砂浆形成的试块,其收缩率不得大于 0.03%,这就充分保证了掺加粉煤灰的混凝土,不会因为掺加粉煤灰而增大混凝土的收缩性。

2.2 粉煤灰的防腐原理

水泥水化过程中会产生 CaOH_2 ,它是溶于水的,因此会被滤出混凝土而在混凝土中形成空隙(很微小),这样,污水、其它氯化物或硫化物就能进入混凝土中,结果是混凝土被腐蚀。当加入粉煤灰后,粉煤灰将和 CaOH_2 、水共同作用产生 C-S-H,这样就降低了 CaOH_2 被滤出的危险。此外,粉煤灰在长期的水化作用下,将改善混凝土的毛细结构,因此,混凝土的渗透性能大大降低,即混凝土的抗渗性大大提高,同时也降低了氯离子侵入的可能性。掺加了粉煤灰的混凝土也能大大降低水、腐蚀性的化学溶液以及氧进入混凝土的速率。

掺加了粉煤灰的混凝土能大大降低氯盐对混凝土的侵蚀速度,在混凝土硬结的初期(比如说 28d)氯盐对掺加粉煤灰的混凝土与对不掺粉煤灰的混凝土的侵蚀速度并没有什么不同。但当混凝土硬结一年以后,氯盐对掺加了粉煤灰的混凝土侵蚀速度要比没有掺加粉煤灰的混凝土的侵蚀速度低数倍。对一个 30 年的大坝进行钻芯取样也证明,氯盐对掺加粉煤灰混凝土的侵蚀速率要比没有掺加粉煤灰的混凝土的侵蚀速率低一个数量级。

这里需要注意的是,虽然粉煤灰有很多优点,但也有缺点。缺点之一是掺加粉煤灰后混凝土的收缩稍稍加大,但通过减少用水量就可很容易地解决该问题。因此,在选用混凝土外加剂时应尽量选用减水率高的外加剂。

如果在混凝土中同时掺加粉煤灰和硅粉,混凝土对抵抗氯离子的能力将显著提高(见 Thomas et al. 1999)。因为,硅粉增加了混凝土在早期抵抗氯离子的能力,而粉煤灰增加了混凝土在后期抵抗氯离子的能力。

微硅粉也叫硅灰,是硅铁或金属硅生产过程中由矿热炉中的高纯石英、焦炭和木屑还原产生

的副产品,主要成分是 SiO_2 。硅粉的粒径都小于 $1\mu\text{m}$,平均粒径为 $0.1\mu\text{m}$ 左右,是水泥颗粒直径的 $1/100$,所以硅粉能高度分散于混凝土中,填充在水泥颗粒之间而提高密实度,同时硅粉具有很高的活性,能更快更全面的与水泥水化产生的氢氧化合物反应。

3 沿海一带氯盐环境下混凝土结构的防腐方法

3.1 几种钢筋防护方法的比较

在氯盐环境下,防止混凝土中的钢筋锈蚀的方法有以下几种:(1)硅灰;(2)环氧涂层钢筋;(3)硅灰+钢筋阻锈剂。

鉴于“盐害”是影响桥梁结构耐久性的主要环境因素,美国混凝土学会(ACI)战略部与几个单位联合研制出 LCCA—365 应用软件,对氯盐环境中常用的各种防护措施进行选用,预测寿命与成本的关系。

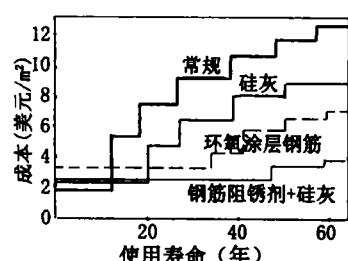


图4 几种防护措施LCCA结果

图4是对桥梁进行 LCCA 分析的结果。可以看出,在盐环境中的常规混凝土(不采取防护措施),虽然初建费是低一点,但大约 15 年便开始第一次修复工程,40 年内要修复 4 次,修复费约为初建费的 4 倍(这与美国桥梁的实际情况相符合);而采用加钢筋阻锈剂同时掺硅灰的方法,40 年内不用修复,初建费略有增加,60 年的总费用较之不采取防护措施者至少节约 70%! 这也正是近年来美国大力推行在密实混凝土的基础上加钢筋阻锈剂的原因所在。

对于方法 1:仅掺加硅灰来提高混凝土密实度的方法可减低钢筋锈蚀,但它不能非常有效地阻止氯离子的强力侵蚀,其最终防护费用最高。

对于方法 2:环氧涂层钢筋防腐能力较佳,但施工苛刻度太高,在运输、绑扎、振捣、焊接的过程中,易于产生局部破损而形成小范围阳极,导致结点锈蚀,这种结点锈蚀由于锈蚀部位集中,阴、阳极比例过大,因此锈蚀速度比普通钢筋的锈蚀快很多,所以比较危险。同时由于环氧涂层钢筋握裹力降低还要增加锚固长度。其最终防护费用较高。

对于方法 3:硅灰+钢筋阻锈剂,是最有效、也是最经济的防止钢筋锈蚀的方法。

3.2 钢筋阻锈剂的种类

目前我国市场上主要有两大类阻锈剂:(1)亚硝酸钙类阻锈剂;(2)改性氨基醇类阻锈剂。

亚硝酸钙类阻锈剂是阳极保护剂,其原理是将阳极完全覆盖,但如果施用量过小则会造成阳极区未被完全覆盖而剩余阳极易于产生快速的结点锈蚀,当其添加量过大时又会使混凝土反应速度过快,易于产生裂缝,由于亚硝酸钙类阻锈剂与不同的水泥和不同的外加剂会有不同程度的反应,因此很难应用恰当用量的缓凝剂来调整反应速度,即使进行试配也会因为实验用量与大体积混凝土散热速度差异巨大而难以把握,此类阻锈剂还影响混凝土的坍落度。

改性氨基醇类阻锈剂是一种新型的钢筋阻锈剂,可高效地进行阻锈,同时可很好地回避亚硝酸钙类阻锈剂在阻锈方法上的缺陷。该阻锈剂为添加型水剂,基于改性氨基醇复合技术,使用时只需将其用水与水泥混合一起加入混凝土中搅拌即可。该阻锈剂的阻锈原理如下。

其阻锈原理与钢筋锈蚀的原理类似,该阻锈剂分子象氯离子或氧气一样以离子态或气态吸附到钢筋表面,由于钢筋的电场较强,因此这些阻锈剂分子是朝向钢筋方向吸附的,到达钢筋表面后即与钢筋反应形成类似铁锈的化学膜,但这一化学膜是相当钝化的,不会象铁锈一样容易溶于水而流失,又由于其氧化性强于氯离子和氧气,因此它可以将氯离子、氧从钢筋表面置换出来,同时阻止氯离子或氧气腐蚀钢筋。

根据调研情况得知:我国许多重点工程,如浙江金塘跨海大桥(18km)、北京 2008 年奥运会工程等都采用了改性氨基醇类阻锈剂(如 Sika FerroGard-901 钢筋阻锈剂)。

3.3 国内沿海污水池结构的防腐方法

目前,国内污水池结构防腐常用的方法主要为如下几种。

1. 柔性防腐:在水池内、外表面(如地下水有腐蚀性时)进行柔性防腐。主要防腐材料有:聚氨酯类、环氧类、环氧煤沥青类、水性聚脂复合型类、聚脲类等。

2. 刚性防腐:在水池内、外表面(如地下水有腐蚀性时)涂刷或喷涂渗透结晶型防腐涂料等。

3. 对混凝土自身进行防腐:在混凝土中添加碳纤维、聚丙烯纤维、杜拉纤维、硅粉、钢筋阻锈剂等。

由于我国目前给排水结构设计规范还没有对

水池防腐进行专门的规定,因此结构设计人员大多参考《工业建筑防腐蚀设计规范》GB50046-95 进行水池结构的防腐设计。该规范在污水池防腐方面也仅仅规定了最低的混凝土标号 C25 和混凝土的抗渗标号 S8 等,更详细的规定基本没有,所以出现了目前各种各样的水池防腐方法。

4 某工程的防腐设计

某沿海城市的污水处理厂位于海边,距海岸线 1km 左右。该场地原来为晒盐场,场地工程地质情况如表 1 所示。

表 1 场地土及其承载力特征值

土层 编号	岩土 名称	地基承载力特征值 f_{ak}					
		物理指标查表			标准贯入		综合 确定 承载力 特征值
		含水 量 W	孔隙 比 e	液性 指数 IL	击数 N	承载力 标准值	
		%	-	-	击	kPa	
①	淤泥质冲填土						
②	粉质粘土	36.7	0.86	0.94	120	2.1	100
③	粉质粘土夹粉砂	34.8	0.85	0.93	130	3.3	110
④	淤泥质粉质粘土夹粉砂	43.0	1.17	1.13	68	1.4	60
⑤	粉质粘土夹粉砂	32.2	0.85	0.74	160	3.6	160
⑥	粉细砂				26.4	220	220
⑦	粉质粘土	23.7	0.76	0.71	190	8.1	180
⑧	细砂				28.8	240	240

勘察场地范围内见有地下水,勘察期间稳定水位埋深为 1.20 ~ 1.70m,平均水位埋深 1.40m。地下水类型为第四系孔隙潜水,补给来源主要为大气降水,水位具有季节性变化,其幅度为 0.5 ~ 1.0m 左右。

4.1 地下水对混凝土结构的腐蚀性评价

地下水中, SO_4^{2-} 含量 = 7200.46mg/L, Mg^{2+} 含量 = 3174.20mg/L,总矿化度 = 59105.68mg/L; PH = 6.7;侵蚀性 CO_2 含量 = 0.00mg/L; NH_4 含量 = 10.0mg/L。结论:在该环境下,地下水对混凝土结构为强腐蚀。

4.2 地下水对钢筋混凝土结构中的钢筋腐蚀性评价

地下水中, CL^- 含量 = $\text{CL}^- + \text{SO}_4^{2-} \times 0.25 = 46236.21 + 7200.46 \times 0.25 = 48036.33\text{mg/L}$ 。结论:干湿交替的情况下,地下水对钢筋混凝土结构中的钢筋有强腐蚀性,在长期浸水时为弱腐蚀。

4.3 地下水对钢结构的腐蚀性评价

地下水中, PH = 7.52, $\text{CL}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 含量 = $46236.21 + 7200.46 = 53436.67\text{mg/L}$;最大冻土深度:1.10m。结论:地下水对钢结构有中等腐蚀。

可以看出,该场地的土壤及地下水对混凝土及钢筋都具有较强的腐蚀性,而且大部分水池为

地下和半地下水池。如何进行有效的防腐设计是该工程的关键。

4.4 该工程污水池结构的防腐设计思路

通过参考美国污水池结构的防腐方法,我国海工、公路混凝土结构防腐蚀设计方面的一些方法,并参考《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES 01-2004,在该工程(沿海一带)的污水池结构防腐设计中考虑如下:(1)选用普通硅酸盐水泥 42.5MPa(冀东等);(2)除选用优质的砂、石料外,还要严格控制砂、石中的含泥量;(3)选用萘系高效复合减水防水剂,要求其减水率大于 25% 以上,抗冻融 F200(武冠外加剂 WG-1);(4)选用一级粉煤灰,其掺量为水泥量的 20% 左右,应通过试验确定最终掺量;(5)选用优质的硅灰,其掺量为水泥量的 4%(挪威埃肯硅粉 Elkem);(6)选用改性氨基醇类阻锈剂,其掺量为每立方混凝土 6kg/m³(瑞士西卡阻锈剂 Sika FerroGard-901);(7)在垫层上、池体外壁与土壤接触的部分涂刷水性聚脂复合型防腐涂料(鲁蒙 LM)。

5 结语

为了发挥国家投资的效益,避免由于池体耐久性差给国家造成不必要的损失,建议对于建在沿海一带的污水处理厂进行必要的防腐设计。同样,对于腐蚀性较强的印染、造纸等工业污水的水池结构也建议进行适当的防腐考虑。鉴于粉煤灰和硅灰在混凝土结构抗腐蚀方面的特性,建议在以后的污水工程结构设计说明中明确混凝土中应掺加适当量的粉煤灰和硅灰,在以后的给水工程结构设计说明中明确混凝土中应掺加适当量的粉煤灰。呼吁尽快出台适合我国国情的水池(污水池及给水工程的水池)防腐方法。

参考文献

- [1] Use of Fly Ash in Concrete, Reported by ACI Committee 232
- [2] Bryce Simons, Fly Ash: Cement Replacement or Mineral Admixture? Concrete International, 60-62, October 2007
- [3] Sika FerroGard® 901&903 Corrosion Inhibitors: Evaluation of Test Programme
- [4] 陈肇元. 混凝土结构耐久性设计与施工指南. 中国建筑工业出版社, 2004
- [5] 国家标准. 工业建筑防腐蚀设计规范 GB50046-95
- [6] 韩静云等. 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, (11): 52-54
- [7] 洪乃丰. 钢筋混凝土桥梁防护与钢筋阻锈剂. 公路, 2002(4)
- [8] 洪乃丰. 基础设施腐蚀防护和耐久性问答. 化学工业出版社, 2003
- [9] 余志钢. 钢筋混凝土结构锈蚀防护技术研究与应用. 铁道标准设计, 2005 年第 4 期