

浙江沿海某水闸混凝土工程病害成因分析及修复

刘超英, 卢良浩

(浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要 对浙江沿海某水闸混凝土工程病害进行检测及分析, 表明该工程病害主要是工程结构混凝土盐污染、混凝土碳化、钢筋保护层厚度严重不足等多种因素综合作用的结果。提出应针对水闸混凝土工程不同类型病害及不同病害程度采用不同的修复对策: 采用 DL470 乳胶配制的水泥砂浆进行修复, 采用外贴碳纤维布进行补强加固处理, 对存在严重安全隐患的混凝土构件进行更换处理。

关键词 水闸; 混凝土结构; 病害检测; 病害成因; 修复

中图分类号: TV66

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2006)S1-0115-03

海洋环境对沿海水工混凝土建筑物耐久性的影响是人们一直关注的问题。浙江沿海水工混凝土建筑物由于受到海洋环境的影响以及设计、施工、管理等因素的影响, 常常出现各种病害、缺陷, 如结构表面产生裂缝、破损、磨蚀、碳化、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀等。这些病害严重地影响了水工混凝土建筑物的耐久性及运行安全。因此, 对水工混凝土建筑物进行病害检测、成因分析以及修复对策研究, 对于确保水工混凝土建筑物的运行安全是十分重要的。本文结合工程实例, 对浙江沿海某水闸混凝土工程进行病害检测^[1], 分析了该混凝土工程的病害成因, 提出了修复对策。

1 工程概况及病害现状

浙江沿海某水闸地处温黄平原金清水系的主要出海口, 是温黄平原防洪排涝的重要骨干工程之一。水闸工程设计总宽度为 102.8 m, 净宽 84.0 m。共有 10 孔, 其中 8 个为排涝孔, 为胸墙式平底闸, 每孔孔口尺寸为 8.0 m × 5.0 m (净宽 × 高), 排涝兼通航孔为 2 孔, 每孔净宽 10.0 m, 最大泄流量 1 446 m³/s, 设计通航标准为 500 t 级。排涝闸门为预应力钢筋混凝土闸门, 液压启闭。通航孔闸门为梁板式钢闸门, 闸门高度 9.5 m, 通航孔闸门及通航孔交通桥均为卷扬机启闭。

该闸于 1995 年 7 月投入运行, 仅运行了 10 年就发现水闸下游局部混凝土结构老化, 病害不断发生, 部分结构病害较为严重, 其中检修门、工作门、通

航孔排架柱、检修平台桥板、通航孔启闭机房、管道间底梁、底板等结构普遍存在混凝土胀裂、钢筋裸露并严重锈蚀、锈损等问题, 混凝土工程病害成因及修复对策十分引人关注。

2 混凝土工程病害检测方案

a. 采用直观量测、外观质量描述、拍照及局部凿开方式对水闸混凝土结构进行外观质量普查检测。

b. 对水闸下游闸墩采用钻芯法检测混凝土抗压强度。对排架柱、胸墙、检修平台及管道间下游梁板、导墙和翼墙采用回弹法检测混凝土强度。

c. 采用酚酞试剂法, 对排架柱、胸墙、管道间下游梁、板及下游导墙、左右翼墙等结构进行混凝土碳化深度检测。

d. 采用电磁法检测了检修门排架柱、工作门排架柱、检修平台、胸墙检修平台、胸墙、管道间底梁、管道间底板、通航孔启闭机房顶梁、通航孔排架柱、检修门库排架柱等结构中钢筋保护层厚度。

e. 采用半电池电位法检测混凝土中钢筋的锈蚀状态, 在此基础上进行钢筋锈蚀率检测。检测了检修门排架柱、工作门排架柱、胸墙、胸墙检修平台、管道间底梁、管道间底板、通航孔排架柱、检修门库排架柱、通航孔启闭机房顶梁等结构。

f. 为了解水闸下游海水中氯离子(Cl^-)含量及其对水闸混凝土的腐蚀程度, 便于对现状工程病害原因进行分析, 对近期海水氯离子(Cl^-)含量进行了检测。

3 病害检测成果及分析

3.1 外观质量

外观质量检测结果见表 1。

3.2 混凝土力学性能

a. 钻孔取芯法检测。闸墩混凝土采用钻孔取芯法检测混凝土抗压强度结果为 :测试龄期抗压强度 31.7 ~ 39.8 MPa ,换算成 28 d 龄期抗压强度 26.4 ~ 33.2 MPa。下游闸墩混凝土测试龄期抗压强度和换算成 28 d 龄期的抗压强度均满足 250 号混凝土设计要求。

b. 回弹法检测。10 根排架立柱 ,其中 7 根回弹强度推定值大于 25 MPa ,满足设计要求(250 号混凝土) ,另有 3 根排架立柱的强度为 21.6 ~ 23.8 MPa ,比设计要求略偏低。2 孔胸墙回弹强度推定值满足设计要求(300 号混凝土)。2 块检修平台板梁回弹强度推定值为 20.7 ~ 21.2 MPa ,不满足设计 300 号混凝土强度要求。1 号孔管道间下游底梁和 4 号孔管道梁下底板回弹强度推定值为 22.0 ~ 23.0 MPa ,比设计强度(250 号混凝土)要求偏低。下游导墙 ,左、右翼墙回弹强度推定值满足设计强度要求。

3.3 混凝土碳化深度

被检测的 17 个结构混凝土的碳化深度 ,除 8 号孔工作门左、右侧外海向立柱混凝土碳化深度达 16 mm 外 ,其余结构混凝土碳化深度均小于 10 mm ,但由于被检病害结构的钢筋保护层厚度普遍小于或

等于 20 mm ,有些部分甚至小于或等于 10 mm ,因此现有混凝土碳化深度有的已接近或超过混凝土保护层厚度 ,混凝土结构内部的钢筋得不到长期有效的碱性保护 ,从而引起钢筋锈蚀 ,混凝土胀裂破坏。

3.4 钢筋保护层厚度

在所有被检测的结构中 ,检修门排架柱钢筋保护层厚度平均值为 23.2 ~ 36.4 mm ,工作门排架柱钢筋保护层厚度平均值为 23.2 ~ 30.6 mm ,检修平台钢筋保护层厚度平均值为 21.8 ~ 37.7 mm ,胸墙检修平台钢筋保护层厚度平均值为 15.0 ~ 25.2 mm ,胸墙钢筋保护层厚度平均值为 36.8 ~ 40.0 mm ,管道间底梁钢筋保护层厚度平均值为 18.8 ~ 35.1 mm ,管道间底板钢筋保护层厚度平均值为 14.8 ~ 15.0 mm ,通航孔启闭机房顶梁钢筋保护层厚度平均值为 9.7 ~ 23.7 mm ,通航孔排架柱钢筋保护层厚度平均值为 37.3 mm ,检修门库排架柱钢筋保护层厚度平均值为 21.0 ~ 31.5 mm。

所有被检测结构中 ,钢筋保护层厚度值都不满足设计要求 ,钢筋保护层厚度设计要求排架柱、胸墙等为 50 mm ,梁、板、检修平台等为 30 mm。大多数钢筋保护层厚度与设计要求相差甚远 ,有的已接近或小于实测的混凝土碳化深度值 ,这将造成混凝土结构内部的钢筋得不到长期有效的碱性保护 ,对钢筋混凝土结构的耐久性将产生严重影响。

3.5 混凝土中钢筋锈蚀

关于混凝土中钢筋锈蚀状态的无损检测 ,目前

表 1 外观质量检测结果

检测部位	外观质量评价
左岸排涝闸检修门库排架柱	左侧外海向排架柱底部 1.0 m 范围内混凝土局部胀裂 ;右侧内河向排架柱离地面 1.8 m 处有 20 cm 长的钢筋露筋 ,锈蚀严重 ,露筋处混凝土保护层厚度很薄(< 2 cm)。
检修门排架柱	7 号孔左侧外海向排架柱有 2 条显著的垂直向裂缝 ,缝长 1.7 ~ 1.8 m ,缝宽 1.0 ~ 1.5 mm ,混凝土局部胀裂。4 处钢筋裸露 ,露筋长度 10 ~ 15 cm ,钢筋严重锈蚀。6 号孔左侧内河向排架柱距地面 0.9 m 处有 3 处露筋 ,露筋长度 15 ~ 20 cm ,钢筋严重锈蚀 ,混凝土胀裂。 4 号孔左侧外海向排架柱 1.30 m 处露筋长约 40 cm ,钢筋严重锈蚀。2 号孔左侧外海向排架柱 0.5 m 处露筋长约 20 cm ,钢筋严重锈蚀 ,右侧外海向排架柱 1.0 m 处露筋长约 30 cm ,锈蚀严重。1 号孔左侧外海向排架柱 1.8 ~ 4.2 m 处有 4 层箍筋露筋 ,长度 60 cm ,钢筋严重锈蚀 ,边角混凝土胀裂。
工作门排架柱	1 ~ 7 号工作门左、右侧外海向排架柱外包水泥砂浆普遍开裂。8 号孔右侧外海向有 3 条严重垂直裂缝、缝长 2.0 ~ 2.6 m ,缝宽 2.0 ~ 3.0 mm。8 号孔左侧外海向排架柱有两个侧面在长达 4.6 m 范围内混凝土严重胀裂 ,钢筋露筋 30 余处 ,露筋长 50 ~ 60 cm ,钢筋严重锈蚀 ,成片剥落 ,钢筋有效截面积减少。局部混凝土保护层厚度较薄(约 1 ~ 2 cm)。
通航孔排架柱	10 号通航孔右侧下游排架柱在 4 m 范围内有 7 处混凝土胀裂 ,露筋并锈蚀 ,右侧中立柱上、下游面分别有 5 ~ 7 处混凝土胀裂 ,露筋并锈蚀。
右岸检修门库排架柱	右侧上游、中间及下游立柱分别有 8 ~ 10 处混凝土胀裂 ,露筋并锈蚀、保护层厚度较薄(约 2 cm)。上游立柱主筋已露 ,箍筋锈蚀并成片剥落。
通航孔启闭机房	通航孔启闭机房 9 号孔左右两侧及 10 号孔右侧水流向 3 根顶梁底部局部混凝土胀裂 ,钢筋裸露并严重锈蚀。右岸启闭机房外部楼梯第 4 层立柱混凝土垂直向严重开裂 ,长度 2.5 m ,缝宽 2 ~ 3 mm。
管道间下游底梁及底板	1 ~ 8 号孔管道间下游底梁均有 5 ~ 10 处混凝土严重胀裂 ,钢筋裸露并严重锈蚀成片状剥落。除 2 号孔底板基本完好外 ,其余 7 孔底板分别有 10 ~ 30 余处混凝土严重胀裂 ,钢筋裸露并严重锈蚀。
下游检修平台	1 ~ 4 号平台底部混凝土严重胀裂 ,上游侧底梁距底部约 5 cm 处水平向全部胀裂 ,钢筋裸露并严重锈蚀成片状剥落。8 号孔平台下游向底梁侧面及底部混凝土严重胀裂破坏 ,下部主筋全部裸露 ,严重锈蚀并成片状剥落。 6 号孔第 3 块及 7 号孔第 3 和第 4 块平台板梁 ,上、下游底梁中部附近均有垂直并贯穿板面的贯穿性裂缝(尤其 6 号孔第 3 块平台板梁有 3 条贯穿裂缝)。

国内外只能进行定性测量,常用的方法为半电池电位法^[2]。工程检测实践表明,现场应用半电池电位法对钢筋锈蚀状态进行定性评价,结果与现场打开检查验证的情况基本一致。而钢筋锈蚀率的检测是在钢筋被打开去除铁锈后,用游标卡尺进行检测。

根据美国 ASTM C876《混凝土中钢筋的半电池电位试验标准》及交通部公路研究院研究成果资料,以及现场打开检查验证情况,钢筋锈蚀状态判据如下:

- ①电位大于 - 150 mV 时,钢筋状态完好;
- ②电位在 - 150 mV ~ - 220 mV 时,钢筋微蚀或局部锈蚀;
- ③电位在 - 220 mV ~ - 300 mV 时,钢筋全面锈蚀;
- ④电位小于 - 300 mV 时,钢筋锈蚀严重。

各检测结构混凝土中钢筋锈蚀状态检测成果见表 2。由表 2 可见,部分检测部位混凝土中钢筋基本处于全面锈蚀或严重锈蚀、锈损状态,钢筋截面最大锈蚀率约为 60%,这将使钢筋混凝土结构的承载力受到很大的影响。

表 2 混凝土中钢筋锈蚀状态检测成果

检测部位	测点电位/mV		钢筋锈蚀状态评价
	范围值	平均值	
8 号孔检修门排架柱	- 163 ~ - 215	- 189.1	局部锈蚀
4 号孔检修门排架柱	- 184 ~ - 286	- 217.6	基本局部锈蚀,局部全面锈蚀
8 号孔工作门排架柱	- 296 ~ - 396	- 333.4	严重锈蚀
8 号孔胸墙	- 171 ~ - 287	- 209.0	基本局部锈蚀,局部全面锈蚀
6 号孔胸墙	- 168 ~ - 265	- 215.1	基本局部锈蚀,局部全面锈蚀
8 号孔胸墙检修平台	- 295 ~ - 411	- 349.9	严重锈蚀,露筋严重,主筋、箍筋成片剥落
4 号孔胸墙检修平台	- 290 ~ - 408	- 343.3	严重锈蚀,露筋严重,主筋、箍筋成片剥落
8 号孔管道间底梁	- 292 ~ - 416	- 357.2	严重锈蚀,露筋严重,主筋、箍筋成片剥落,截面最大锈蚀率约为 40%
4 号孔管道间底梁	- 295 ~ - 398	- 326.5	严重锈蚀,露筋严重,主筋、箍筋成片剥落,截面最大锈蚀率约为 60%
4 号孔管道间底板	- 278 ~ - 398	- 357.9	严重锈蚀,露筋严重,钢筋成片剥落。截面最大锈蚀率约为 60%
1 号孔管道间底板	- 329 ~ - 434	- 363.3	严重锈蚀,露筋严重,钢筋成片剥落。截面最大锈蚀率约为 60%
10 号孔通航孔排架柱	- 177 ~ - 222	- 183.8	局部锈蚀
检修门库排架柱	- 243 ~ - 332	- 287.7	基本全面锈蚀,局部严重锈蚀
9 号孔通航孔启闭机房顶梁	- 236 ~ - 341	- 279.2	基本全面锈蚀,局部严重锈蚀

3.6 水闸下游海水氯离子(Cl⁻)含量

水闸下游 3 个海水取样点的实测 Cl⁻ 质量浓度分别为 13 497 mg/L,15 200 mg/L,14 867 mg/L,平均为 12 848.5 mg/L (注:水闸下游水样取样点是按距离闸室由近及远的顺序排)。

根据 GB 5021—2001《岩土工程勘察规范》中第 12.2.4 条规定,水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性评价规定,在干湿交替环境下,当水中 Cl⁻ 质量浓度大于 5 000 mg/L 时应属强腐蚀等级。由实测结果可见,本工程海水 Cl⁻ 质量浓度大于 10 000 mg/L,远远超过规范规定的强腐蚀等级要求,海水氯离子含量对水闸钢筋混凝土结构将起到严重的腐蚀作用。

4 病害成因分析及修复对策

4.1 病害成因分析

根据混凝土中钢筋锈蚀机理及检测结果分析,造成目前水闸下游闸墩以上结构混凝土病害严重、混凝土普遍胀裂、钢筋局部裸露并严重锈蚀的主要原因是混凝土的盐污染和混凝土的碳化,破坏了混凝土中的钢筋钝化膜。具体分析如下^[3]。

4.1.1 混凝土的盐污染

该水闸下游海水中氯离子含量很高,严重超标,属强腐蚀等级,而该水闸在工程运行中,每年在台风期间,下游检修平台、立柱及管道间板梁等结构经常受外海潮浪冲击和浸泡,处于含盐雾的大气中。海水中氯离子逐渐向钢筋混凝土结构内渗透,由于这些钢筋混凝土结构中钢筋保护层厚度严重不足,氯离子较容易渗入钢筋,造成钢筋钝化膜被破坏,从而引起钢筋锈蚀,锈蚀结果引起体积膨胀,从而造成面层混凝土胀裂、钢筋裸露,更加速锈蚀。

当钢筋周围的混凝土孔隙液中氯离子质量浓度达到某临界值时,由于氯离子比其他阴离子更易渗入钝化膜,与铁离子结合为易溶的二价铁与氯化物的复合物(绿锈),因此即使混凝土碳化深度还很浅,钢筋周围的混凝土孔隙液仍具有高碱性,钝化膜也会遭到破坏。由此可见,氯盐是促使钢筋锈蚀、威胁钢筋混凝土建筑物耐久性的最危险的物质。

4.1.2 混凝土碳化、保护层厚度严重不足

混凝土碳化过程中逐渐由碱性转化为中性,在正常情况下,混凝土孔隙水为水泥水化时析出的 Ca(OH)₂ 和少量钾、钠氢氧化物所饱和而呈碱性,其 pH 值在 11 以上。钢筋在这种介质中表面形成钝化膜、能有效地抑制锈蚀。而当混凝土碳化后混凝土中 pH 值降至 9 以下,保护钢筋的钝化膜就处于活性状态。在氧和水的作用下,钢筋便产生电化学腐蚀,钢筋一旦锈蚀其体积会比原体积大 2~3 倍,产生膨胀而使混凝土保护层胀裂、剥落破坏。

该水闸大多数钢筋保护层厚度严重不足,与设计要求相差甚远,同时由于局部结构混凝土碳化深度已超过钢筋保护层厚度,造成混凝土结构内部的钢筋得不到长期有效的碱性保护,(下转第 129 页)

2 试验结果

从上述试验过程及图 1~3 中可以得出当铺土厚度为 50 cm,碾压遍数为 6 遍时(最大干密度为 1.821 g/cm³,含水率可达 11.3%),既能够达到设计要求的压实干密度,也满足了施工要求。

3 结 语

从碾压试验的整个试验过程来看,在碾压机械确定的情况下,采用不同的铺土厚度和碾压遍数所得的压实土体的干密度和结合层的情况有明显差异。相同的压实机械,相同的铺土厚度,当碾压遍数增加到 6 遍时,其干密度值达到了最大,而当碾压遍数增加到 8 遍时,其最大干密度反而随着碾压遍数的增加而减小了,并且其干密度值已经不能满足设计要求。分析其原因是由于碾压遍数过多,压实土体发生了剪切破坏,即破坏了土体的整体结构,使之发生分层,从而导致了干密度值的降低,并且其最大干密度已不能满足设计要求,因此 8 遍碾压遍数不能采用。当碾压 4 遍时只有铺土厚度为 40 cm 的试

验段符合要求(即试验段上没有弹簧土和光面土,其最大干密度符合设计要求,结合层面没有虚土层,上下层结合良好,且土体没有剪切破坏)。当碾压 6 遍时铺土厚度为 40 cm 和 50 cm 的两个试验段符合要求。从施工进度和经济角度考虑,铺土厚度为 50 cm,碾压遍数为 6 遍,含水率控制在 10%~14% 为最优施工碾压参数。应当注意的是,由于土场中土为黏质粉土,土中的水分易损失,因此在坝体施工中应及时在结合层面上洒好结合水。土场土料的含水率偏低时应及时洒水,含水率偏高时应及时晾晒,并在施工中严格控制铺土厚度,以确保施工的顺利进行,从而提高整个坝体的施工进度。

参考文献:

[1] DL/T5129—2001 碾压式土石坝施工规范[S].
[2] SL275—2001 核子水分-密度仪现场测试规程[S].
[3] SL260—98 堤防工程施工规范[S].
[4] SL237—1999 土工试验规程[S].
[5] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S].
(收稿日期 2006-05-23 编辑 骆超)

(上接第 117 页)因此由于混凝土的碳化、保护层厚度严重不足所引起的钢筋锈蚀也是造成混凝土胀裂破坏的另一个重要原因。

4.2 病害修复对策

该水闸下游闸墩以上混凝土构件在较大范围产生的病害,必须进行及时处理,否则这些病害会不断延伸扩大,将直接影响水闸的安全运行。现根据钢筋混凝土构件病害的不同程度,提出以下修复对策^[4]。

a. 现状 6 号孔第 3 块及 7 号孔第 3 块、第 4 块检修平台板梁构件中部上下游均有垂直的贯穿性裂缝(尤其突出的是 6 号孔第 3 块平台上有 3 条贯穿性裂缝),存在较大安全隐患,应予尽快更换或加固。

b. 对现状构件病害的处理建议采用美国陶氏瑞固特种乳胶有限公司生产的 DL470 乳胶配制的水泥砂浆进行修复。室内试验结果表明,该材料具有较高的抗压强度和抗拉强度,龄期 28 d 时抗压强度达到 84.5 MPa,抗拉强度达到 5.1 MPa。另外,该材料与老混凝土有较好的黏结性能,并具有较好的抗腐蚀性能,是一种较理想的混凝土修复新材料。

c. 对部分重要的受力构件(如右岸启闭机房大梁等)或病害严重的构件,除采用 DL470 乳胶砂浆修复外,建议采用外贴碳纤维布作进一步补强加固处

理。碳纤维材料具有轻质、高强、抗腐、耐老化、稳定性好等特点,其抗拉强度是同等截面钢材的 7~10 倍。目前碳纤维布补强加固技术已在我国混凝土结构修复加固工程中得到广泛应用。

5 结 语

通过对浙江沿海某水闸混凝土工程进行病害检测与成因分析,表明造成该水闸混凝土工程病害的主要原因是混凝土的盐污染和混凝土的碳化,氯离子和二氧化碳破坏了混凝土中的钢筋钝化膜。提出了混凝土工程病害修复对策即采用 DL470 乳胶配制的水泥砂浆和碳纤维布补强加固技术,为水闸混凝土工程的病害处理提供了科学的依据。

参考文献:

[1] 李为杜.混凝土无损检测技术[M].上海:同济大学出版社,1995.
[2] 刘超英,孙伯永.水工混凝土中钢筋锈蚀检测技术及应用[J].浙江水利科技,2003(2):38-39.
[3] 蒋元嗣,韩素芳.混凝土工程病害与修补加固[M].北京:海洋出版社,1996.
[4] 乔生祥,黄华平.水工混凝土缺陷检测和处理[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
(收稿日期 2006-02-24 编辑 高建群)