

海水环境下混凝土结构耐久性设计探析

刘书整

(成都市建筑设计研究院, 四川成都 610015)

【摘要】总结了 2005 年为“成都虎豹海洋世界”设计中海水环境中混凝土耐久性问题, 考察了新加坡圣淘沙的海底世界、青岛水族馆、湖南海底世界, 并翻阅收集了国内外大量资料, 就海水中混凝土耐久性技术措施进行了设计分析探讨, 为设计人员在相似设计中提供参考。

【关键词】 海水环境; 混凝土; 耐久性; 防腐蚀策略

【中图分类号】 TU352.3

【文献标识码】 B

1 海水环境

海水的氯离子 (Cl^-) 是影响混凝土结构耐久性的主要原因之一。混凝土中钢筋锈蚀可由两种因素诱发, 一是海水中 Cl^- 侵蚀, 二是大气中的 CO_2 使混凝土中性化。国内外大量工程调查和科学研究结果表明, 海水环境下导致混凝土结构中钢筋锈蚀破坏的主要因素是 Cl^- 进入混凝土中, 并在钢筋表面聚集, 导致钢筋产生电化学腐蚀。海水通常含有 3% 的盐, 其中主要是氯离子。以 Cl^- 计, 海水中的含量约为 19 000 mg/L。

2 氯离子对钢筋的锈蚀

Cl^- 进入混凝土中通常有两种途径: 其一是“混入”, 如掺用含氯离子外加剂、施工用水含氯离子、在含盐环境中拌制、浇筑混凝土等; 其二是“渗入”, 环境中的氯离子通过混凝土的宏观、微观缺陷渗入到混凝土中, 并到达钢筋表面。“混入”现象大都是施工管理的问题; 而“渗入”现象则是综合技术的问题, 与混凝土材料多孔性、密实性、工程质量以及钢筋表面混凝土层厚度等多种因素有关。

2.1 破坏钝化膜

水泥水化的高碱性使混凝土内钢筋表面产生一层致密的钝化膜。钝化膜只有在高碱性环境中才是稳定的, 当 $\text{pH} < 11.5$ 时, 就开始不稳定; 当 $\text{pH} < 9.88$ 时该钝化膜生成困难或已经生存的钝化膜逐渐破坏。 Cl^- 是极强的去钝化剂, Cl^- 进入混凝土到达钢筋表面吸附于局部钝化膜处时, 可使钢筋表面 pH 值降低到 4 以下, 从而破坏钢筋表面的钝化膜。

2.2 形成腐蚀电池

如果在大面积的钢筋表面上具有高浓度氯化物, 则氯化物所引起的腐蚀可能是均匀腐蚀, 但是在不均质的混凝土中, 常见的是局部腐蚀。腐蚀电池作用的结果是, 在钢筋表面产生蚀坑。由于大阴极对应于小阳极, 蚀坑发展十分迅速。

2.3 去极化作用

Cl^- 不仅促成了钢筋表面的腐蚀电池, 而且加速了电池

的作用。混凝土中 Cl^- 的存在强化了离子道路, 降低了阴阳极之间的欧姆电阻, 提高了腐蚀电池的效率, 从而加速了电化学腐蚀过程。

3 提高海水混凝土耐久性的技术措施

3.1 高性能混凝土

高性能混凝土以耐久性作为首要指标, 就海水工程而言, 侧重于高性能、抗渗性、体积稳定性、强度等。目前, 国内外海工高性能混凝土的研究与应用方兴未艾。在荷兰, 对已使用 3~63 年的 64 座海工结构 (其中 90% 的结构采用磨细矿渣混凝土) 调查发现, 结构基本完好, 氯离子扩散系数仅为普通混凝土的 1/10~1/15。典型事例为东谢尔德挡潮闸工程, 其设计使用寿命是 250 年, 80 年不维修, 其基本防腐措施就是采用水胶比为 0.4 的大掺量 (65%) 磨细矿渣混凝土。在英、美、加、日和中东等国家和地区, 也都有类似的成功工程应用实例。

国内外有关实验研究和工程实践证明, 养护对高性能混凝土的质量和耐久性十分重要。常温下养护不够, 对高性能混凝土的质量与耐久性的影响程度有时甚至高于普通混凝土。因此, 及时、充分的湿养护是使其获得高强度、低孔隙率和高抗氯离子扩散能力所必不可少的。另外高性能混凝土相对于普通混凝土在搅拌时间、振捣、拆模时间上都有区别。因此在高性能混凝土实施前需要根据其特点制定专门的质量控制措施。

3.2 钢筋阻锈剂

海水混凝土中钢筋的腐蚀, 事实上是一种电化学反应, 其阴、阳极反应都在钢筋与电解质界面上发生。若能阻止其中任何一种界面反应, 就能抑制腐蚀。

使用阻锈剂时, 首先应控制开裂程度, 尤其是对梁类构件的受弯拉区域。因此, 宜采用高性能混凝土来控制裂缝的产生与发展, 再用钢筋阻锈剂抑制腐蚀, 最后用具有一定弹性

[收稿日期] 2007-06-15

[作者简介] 刘书整 (1958~), 高级工程师, 长期从事结构设计。

的涂层封闭涂装,以起到协同保护作用。这样钢筋阻锈剂起到“拾遗补缺”和“消防队员”的作用,有效地阻止钢筋腐蚀发生,从而延长钢筋混凝土的使用寿命。

3.3 增加混凝土保护层厚度

增加混凝土保护层厚度,这是提高海洋工程钢筋混凝土使用寿命的最为直接、简单而且经济有效的方法。但是保护层厚度并不能无限制地增加。当保护层厚度过厚时,混凝土材料本身的脆性和收缩会导致混凝土保护层出现裂缝反而削弱其对钢筋的保护作用。

3.4 涂料涂层保护

海洋工程钢筋混凝土中实施涂料涂装保护是一种经济实用的防腐蚀技术措施。但涂装质量的控制十分关键,一旦局部存在各种缺陷与针孔被氯离子突破,则在一定范围内涂层的封闭保护作用将会丧失。因此,实施涂料涂装的钢筋混凝土构件,首先必须进行控裂设计,至少达到构件在不同工况条件下受拉弯区裂缝的缝宽基本不变,以确保涂层保护的效果。完好的混凝土保护层具有阻挡腐蚀性介质与混凝土接触的特点,从而延长混凝土和钢筋混凝土的使用寿命。

3.5 涂层钢筋

海水环境中的氯盐对不受冻地区的素混凝土而言是无害的,腐蚀破坏是通过钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀膨胀实现的。因此,若将钢筋表面预先施加一层不腐蚀或耐腐蚀的涂层来阻挡或隔离氯离子的侵蚀,是最为直接的技术措施。环氧涂层钢筋是在严格控制的钢厂流水线上涂覆的,可以保证涂层高质量。涂层可以将钢筋与周围的混凝土隔开,即使氯离子和氧气等已经大量侵入混凝土,它还是可以长期保护钢筋,使钢筋免遭腐蚀。

环氧涂层钢筋的储运、安装和绑扎过程中,不允许存在任何隐患与缺陷,否则就会局部显著地加剧钢筋腐蚀,最终导致混凝土保护层开裂使环氧涂层钢筋遭受腐蚀。因此,须慎重使用。

4 几种方案优缺点比选

不同类型增强混凝土耐久性措施优劣性对比见表 1

表 1 增强混凝土耐久性措施比较

方案	优 点	缺 点
高性能混凝土	有一定的技术保障,且有成功实例;混凝土的耐久性显著提高并具有良好的工作性能;性价比较高	对施工质量要求高,必须确保养护时间;在施工前须做配合比实验,需要有一定的人力和时间
阻锈剂	可有效地阻止钢筋锈蚀	增加费用较多;对混凝土结构要采取一定的限裂措施
增加混凝土保护层	经济合理;施工简便	对混凝土保护层应采取限裂措施
涂料涂层保护	经济合理;技术成熟;对氯离子渗透起到一定延缓作用	涂料耐久性差;质量控制要求高
涂层钢筋	从根本上解决钢筋防腐;可提高建筑物的使用年限	施工要求高,不允许钢筋涂层出现局部破损,否则会加剧钢筋局部腐蚀;工程造价较高

5 高性能混凝土的质量保证措施

为确保混凝土结构耐久性的目标,须从三大环节进行控制。

(1) 在了解工程背景、使用环境以及混凝土材料在海水环境中的性能特点的基础上,预先质量控制与评估,通过对材料性能的试验研究,建立混凝土结构耐久性设计的数据和依据,并预测混凝土结构的实际使用性能。

(2) 充分考虑各种可变因素对钢筋混凝土结构使用寿命的影响,如环境温度、混凝土内应力、裂缝等,以建立使用寿命预测系统,为耐久性方案的设计提供指导和依据。再以使用寿命预测系统为基础,制定有针对性的耐久性解决方案。

(3) 在质量控制与评估环节中,方案的实施过程是如何控制各方面的质量以及如何对已完成部分的质量进行评估,需要确立各种质量控制措施和实施标准,建立各种性能试验的评价体系,保证混凝土性能符合方案设计要求。在实际施工过程中,质量控制与评估将是重中之重。相对普通混凝土的质量控制而言,高性能混凝土施工质量控制主要涉及原材料质量、配合比、拌和、施工、保护层厚度、养护等方面,其重点和难点在于保护层厚度和养护等方面。第一,高性能混凝土保护层垫块采用变形多面体形式,工程塑料夹或高性能细石混凝土预制,垫块材料的强度及抗渗透性均不低于本体高性能混凝土的技术标准。第二,高性能混凝土的顶面混凝土由于阳光直射温度较高产生温差过大的现象,同时由于风速较大也容易造成混凝土表面失水过快,混凝土表面收缩较大而导致混凝土开裂。因此,在实际施工过程中,混凝土浇筑完毕后即在顶面加盖塑料薄膜顶棚以保温保湿。

6 海洋工程结构混凝土耐久性策略

根据以上分析,从材质本身的性能出发,对主因和导因对症施治,在“成都虎豹海洋世界”工程设计中的大洋展示区、珊瑚池、平衡池、维生系统、鲨鱼检疫池及亚马逊区处于四类环境的混凝土梁、板、墙、柱采用强度不小于 42.5 MPa 的硅酸盐水泥,要求水泥中 C₃A 含量不超过 8%,水泥细度不超过 350 m²/kg,游离氧化钙不超过 5%。强度等级 C40 时,最大水灰比为 0.45,最小水泥用量 320 kg/m³,最大碱含量 3 kg/m³,最大氯离子含量 0.1%。添加了有机胺盐类与亚硝酸钠的复合阻锈剂,并辅助 JS 复合材料。为保证混凝土的均匀性,搅拌混凝土采用卧轴式搅拌机,泵送混凝土的坍落度不能过大,以避免离析和泌水。要求在混合使用膨胀剂、阻锈剂及其他防腐剂时,应事先专门测定它们之间的相容性,严格控制外加剂中的氯离子含量不得大于混凝土中胶凝材料总重的 0.02%。混凝土保护层为 50 mm,保护层定位采用工程塑料夹,垫块的尺寸和形状必须满足保护层厚度和定位的允差要求,垫块的强度应高于构件本体混凝土,水胶比不大于 0.4。浇筑混凝土前,应仔细检查定位夹,并应指定专人做重复性检查以提高保护层厚度尺寸的施工质量保证率。(下转第 150 页)

1.5 四种参数灵敏度的比较

取一个具有四个自由度无阻尼系统,如图 1 所示。其中 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 100 \text{ N/m}$ $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 1 \text{ kg}$

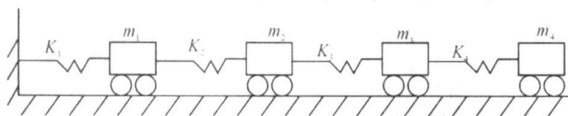


图 1 一个四自由度的弹簧——质量系统

系统的刚度矩阵,质量矩阵分别为:

$$K = \begin{bmatrix} 200 & -100 & 0 & 0 \\ -100 & 200 & -100 & 0 \\ 0 & -100 & 200 & -100 \\ 0 & 0 & -100 & 100 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

系统的特征频率为:

$$\omega_1 = 3.4730 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 10 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = 15.3209 \text{ rad/s}$$

$$\omega_4 = 18.7939 \text{ rad/s}$$

系统正则化特征向量为:

$$\{\phi\}_1^T = \{0.2280 \ 0.4285 \ 0.5774 \ 0.6565\};$$

$$\{\phi\}_2^T = \{-0.5774 \ -0.5774 \ 0 \ 0.5774\};$$

$$\{\phi\}_3^T = \{-0.6565 \ 0.2280 \ 0.5774 \ -0.4285\};$$

$$\{\phi\}_4^T = \{0.4285 \ -0.6565 \ 0.5774 \ -0.2280\}.$$

由于篇幅的限制,现只列出四种参数的灵敏度的最大值和最小值。固有频率对 k_i 的灵敏度的变化率的最大值是 0.0314 最小值是 0 振型对 k_i 的灵敏度的变化率的最大值是

0.0152 最小值是 0 动柔度对 k_i 的灵敏度的变化率的最大值是 -0.2532 最小值是 0.0001 从数值的大小可以看出动柔度的灵敏度的变化率是最大的,是振型的 25 倍多。而从曲率对 k_i 灵敏度的变化率的公式,即式 (10) 可以看出曲率的灵敏度在求导的部分: $\frac{\partial \phi_i(e-1)}{\partial k_{ij}} + \frac{\partial \phi_i(e+1)}{\partial k_{ij}} - \frac{\partial \phi_i(e)}{\partial k_{ij}}$ 与振型的灵敏度是一个数量级,但是当在外面乘以 $1/(2L)$ 后,灵敏度的大小就与所划分单元的长度的平方成反比。所以说曲率的灵敏度的变化率取决于划分单元的多少,如果所划分的单元即 L 取得足够小的话,曲率灵敏度的变化率可以任意增大。

2 结 论

从数值计算结果说明以动柔度或曲率为损伤识别参数的灵敏度比单独用频率或振型时的灵敏度高,所以在测量结构损伤时可优先选择动柔度或者曲率作为损伤识别参数。由于曲率的灵敏度还受到所划分单元多少的限制,所以在实际操作中要视情况而定。

参 考 文 献

- [1] 曹晖, Michael Friswell 基于模态曲率的损伤检测方法 [J]. 工程力学, 2006(4).
- [2] 师本强. 基于动柔度变化的结构损伤检测 [J]. 工程力学 2001 (增刊).
- [3] International Modal Analysis Conference Effects of measurement statistics on the detection on damage in the Alamosa Canyon bridge. Proceeding of the International Modal Analysis Conference & Exhibit 1997
- [4] 李健康 张春利, 解辛辛. 板类结构动力检测与控制中的一种新方法 [J]. 动力学与控制学报, 2005(9).

(上接第 148 页) 绑扎垫块和钢筋的铁丝头不得伸入保护层内。在新浇混凝土表面应及时浇水或覆盖湿麻袋进行养护, 在混凝土发热阶段采用喷雾养护, 确保搭接处的密封, 保证模板连接缝处不至于失水干燥。与海水接触框架柱的受力纵筋采用环氧树脂涂层钢筋。

实践表明, 采用高性能混凝土是在海水环境下提高结构耐久性的基本措施, 然后根据不同构件和部位, 提高钢筋保护层厚度 (一般不小于 50 mm), 某些部位还可复合采用保护层或阻锈剂等辅助措施, 形成以高性能海工混凝土为基础的综合防护策略, 有效提高海工混凝土结构的使用寿命。因此, 设计遵循的基本方案是: 首先, 混凝土结构耐久性基本措施是采用高性能混凝土, 同时依据混凝土构件所处结构部位及使用环境条件, 采用必要的补充防腐措施, 如内掺钢筋阻锈剂、混凝土外保护层等。在保证施工质量和原材料品质的前提下, 使海水中的混凝土结构的耐久性达到设计要求。

7 结束语

综上所述, 海水中结构混凝土耐久性的首要因素是混凝土的 Cl^- 渗透速度。针对这一具体情况, 并考虑当地的实际情况——如原材料的可及性、工艺设备的可行性等, 以及经济上的合理性, 采取以高性能混凝土技术为核心的综合耐久性策略和方案。确保工程实际情况中技术水平的施工措施和质量保证措施以保证海水环境下混凝土构件的设计使用年限。

参 考 文 献

- [1] 吴中伟. 高性能混凝土 (HPC) 的发展趋势与问题 [J]. 建筑技术, 1998, 29(1).
- [2] 孙正平, 张冠伦. 高性能混凝土的研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- [3] 金伟良. 混凝土结构耐久性 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [4] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003