

文章编号: 1005-0523(2007)04-0021-04

跨海大桥全寿命耐久性设计与施工技术

黄毅, 孙建渊, 黄士柏

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:在海洋恶劣环境影响因素下,桥梁结构的耐久性为跨海大桥寿命期内安全运营的关键问题.通过分析影响跨海大桥结构耐久性的主要因素,提出了改善并提高结构耐久性的主要途径与技术对策,最后给出了东海大桥主要混凝土结构、钢结构及钢管桩基础全寿命耐久性实用设计与施工技术概要.根据试验及使用效果证明东海大桥提高海洋桥梁结构耐久性的技术措施是可行有效的.

关键词:耐久性设计与施工;跨海大桥;海洋环境

中图分类号: TU45

文献标识码: A

1 概述

在海洋环境中建设桥梁,由于桥梁结构将长期经受外部介质的强烈影响,作用的结果可能导致桥梁结构迅速破坏,并严重降低使用寿命.因此建设跨海大桥对结构的耐久性和使用寿命有很高的设计与施工技术要求,中国公路桥涵结构的设计基准期即设计使用寿命规定为100年.



图1 东海大桥鸟瞰图

处于海洋恶劣环境条件下桥梁结构的耐久性历来是工程界关注的焦点问题.东海大桥是中国大陆真正意义上的第一座跨海大桥,通过对桥梁结构耐

久性影响因素的系统研究,提出了跨海大桥全寿命耐久性设计与施工技术的对策,确保了东海大桥设计寿命期内的正常使用.图1为中国东海大桥竣工后鸟瞰图.

2 海洋环境中影响结构耐久性的因素

2.1 影响混凝土结构耐久性的因素

影响混凝土结构耐久性的因素包括内在因素和外在因素.内在因素如混凝土结构保护层厚度、水灰比、胶凝材料组成、裂缝等.外在因素一方面是环境因素,主要为潮湿、高温、氯离子侵蚀、化学介质侵蚀、冻融、磨蚀破坏等,这些破坏既涉及到钢筋锈蚀又涉及到混凝土结构的解体;另一方面是人为因素,主要是施工质量差和运行管理不善.施工缺陷的存在,不仅使得外界有害物质更易侵入混凝土,导致钢筋混凝土过早发生腐蚀破坏,从而影响耐久性,而且可能影响结构的安全运营.

在海洋环境下,对海工混凝土使用寿命起决定性作用的是海水中氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀作用.因此,对于跨海大桥混凝土结构的耐久性问题应着重关注其钢筋锈蚀作用.

2.2 影响钢结构耐久性的因素

钢结构在海洋环境条件下,容易产生腐蚀现象.海洋环境下钢质结构按使用环境条件可分为五大腐蚀区:海上大气区、浪溅区、水位变动区、水下区、泥下区,这些区域的腐蚀条件、腐蚀特征和腐蚀速率各不相同.在海洋大气环境下,海水常年蒸发增加了钢结构周围的环境湿度,并促使酸性气体及盐粒的溶解,成为较强的电解质,加速钢结构不断遭受电化学腐蚀,随着大气中相对湿度的增加,腐蚀急剧增加;在浪溅区,这里海水飞溅、干湿交替、盐分高、温度高,是腐蚀最强烈的区域;在水下区低于平均低潮线几十厘米处,这里与水位变动区组成了氧浓差电池,该部位是阳极区,因而受到严重的腐蚀;在泥下区界面以下几十厘米处,这里(与水下区形成氧浓差电池,再加上硫酸还原菌的作用,腐蚀也比较严重.因此对于跨海大桥钢结构的耐久性问题,应着重关注不同区域的使用环境条件对其腐蚀影响.

3 跨海大桥提高耐久性的技术途径

3.1 提高混凝土结构耐久性的技术措施

鉴于外海桥梁的特点,在设计过程中可以主要考虑以下几个方面的混凝土防腐技术措施:

- (1) 提高混凝土中钢筋的保护层厚度;
- (2) 控制混凝土的水灰比.水灰比越接近最低水灰比,混凝土的密实性越高,抗腐蚀性能越好,因此提高混凝土的耐久性应选择低水灰比的混凝土;
- (3) 阻锈剂;
- (4) 应用环氧涂层钢筋;
- (5) 混凝土表面涂层;
- (6) 阴极保护.阴极保护方法是通过电化学方法强迫保护钢筋,可防止氯化物引起的钢筋腐蚀;
- (7) 高性能混凝土.对于混凝土结构的耐久性而言,防止钢筋的锈蚀是最主要的内容.高性能砼在这方面具有独特的优势,高性能砼是以高耐久性为目标发展起来的,突出表现在混凝土材料低渗透、低缺陷、高密实等方面.高性能混凝土与普通混凝土的差别在于通过掺入粉煤灰、磨细矿渣粉、微硅粉中的一种或多种掺料,来提高混凝土在特定条件下所需要的特定性能.试验证明,高性能混凝土具备优良的抗氯离子侵蚀能力,与普通混凝土相比,最少可以延长使用寿命3~4倍以上^{[1][2]}.

3.2 提高钢结构耐久性的技术措施

目前,海洋工程钢结构常采取的防腐措施分为三种:机械隔离措施、金属喷涂、阴极保护.机械隔离

措施即采用某种材料包覆在待保护材料表面,使之与海水、氧气等产生腐蚀的物质隔离以达到防腐的目的;金属喷涂防腐包括喷涂金属层和封闭涂层.该措施是采用火焰喷涂方法或电弧喷涂方法将熔融金属锌、铝或其合金喷射到处理后的钢结构表面,在其表面形成一层致密、均匀的薄层,这层金属涂层一方面对结构起到机械封闭作用,另一方面也起到局部牺牲阳极的保护作用;阴极保护措施一般适用于水下部位,对水位变动区也有一定的保护作用.

4 东海大桥结构耐久性设计应用

4.1 工程概况

举世瞩目的东海大桥是上海国际航运中心集装箱深水枢纽港的三大重要配套工程之一,全长约32.5 km,主通航孔采用主跨420 m双塔单索面叠合梁斜拉桥;三个副通航孔采用主跨120 m、140 m、160 m预应力混凝土连续梁桥及刚构桥;港桥连接段的颍珠山大桥主桥采用主跨332 m双塔双索面的叠合梁斜拉桥.

东海大桥桩基础主要采用钻孔桩、PHC桩和钢管桩,其中 $\Phi 1\ 500$ 的打入钢管桩有5 319根, $\Phi 1\ 200$ 的打入PHC桩有398根.

4.2 东海大桥混凝土结构耐久性技术对策

海洋环境下钢筋混凝土结构耐久性方案的设计应该遵循的基本方案是:首先,提高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.二者的有机结合就是综合防腐措施.针对东海大桥所处海洋环境特点和设计寿命要求,混凝土结构耐久性综合防腐策略内容为:

(1) 大桥主结构以高性能混凝土为基本措施,涉及混凝土钻孔桩、承台、墩柱和箱梁等.

(2) 对于混凝土结构保护层相对较小且位于浪溅区或潮差区等薄弱环节,采用混凝土外部保护层.海上段混凝土结构耐久性技术对策见表1.

混凝土结构中钢筋腐蚀最严重的是浪溅区,其次依次是水位变动区、大气区、水下区.长期处于水下的混凝土结构由于缺乏供氧条件,钢筋腐蚀极为缓慢.因此,在设计外海混凝土桥梁时应根据各构件所处的环境条件,有针对性地采取不同的防腐要求和措施.东海大桥有大量构件位于腐蚀严重的浪溅区,如钻孔灌注桩桩头、承台、墩柱、塔柱下部等,因此在大桥这些部位不仅采用了高性能混凝土,还

表 1 东海大桥海上段混凝土结构耐久性技术对策^[4]

结构部位	海洋环境分类	保护层厚度 (mm)	混凝土强度等级	混凝土品种	辅助措施
钻孔灌注桩	水下区、桩头水位变动区	70	C30	大掺量掺合料混凝土	上部为不拆除的钢套筒
承台	水位变动区、浪溅区	90	C40	高性能混凝土	水位变动区、浪溅区部位涂防腐涂层
墩柱	水位变动区、浪溅区	70	C40	高性能混凝土	水位变动区、浪溅区部位涂防腐涂层
箱梁	大气区	40	C50	高性能混凝土	
桥面板	大气区	40	C60	高性能混凝土	
塔柱	下部为水位变动区、浪溅区,上部为大气区	70	C50	高性能混凝土	水位变动区、浪溅区部位涂防腐涂层

配合混凝土外部保护层以提高其耐久性.

4.3 东海大桥钢结构耐久性技术对策

东海大桥全长 32.5 公里,其中包括两座斜拉桥用于海上通航.斜拉桥上部结构为钢箱梁构造,在海洋大气环境下,海水常年蒸发增加了钢结构周围的环境湿度,空气中饱含酸性气体及盐类离子,成为较强的电解质,加速钢结构不断遭受电化学腐蚀,因此大桥上部钢结构的防腐保护,关系到大桥的安全与使用寿命.东海大桥采用在火焰喷铝技术上更新创造的电弧喷铝防腐体系,即在电弧喷铝的基础上加上封闭漆、中间漆、面漆组合而成的防腐体系,是目前最为长效安全、经济实用的技术,使用寿命可达 50 年.电弧喷铝防腐技术是将铝作为金属涂层材料的电弧喷涂技术,属于热喷涂技术中比较普遍使用的一种长效防腐技术.它以电弧为热源将铝丝加热,使受热的铝丝形成熔融或半熔融状态的细微颗粒,在高速气流的吹动下,这些颗粒高速冲击并沉积在钢结构基体的表面上,形成铝金属防腐涂层,将钢箱梁表面与外界大气隔绝开来,阻止了海洋潮湿环境对钢结构的侵蚀;同时铝隔离层也起到了牺牲阳极的保护作用,对大桥上部钢结构起到了有效的防腐保护.在喷铝金属涂层的基础上还有封闭漆、中间漆、面漆组合而成的长效防腐涂层体系,封闭漆涂层可有效渗透覆盖的金属涂层表面孔隙,将钢铁、金属涂层和防腐介质分隔开,起保护作用,并承上启下,与面漆优异结合;面漆涂层对整个涂层进行保护并有美化外观的作用.

4.4 东海大桥钢管桩耐久性技术对策

东海大桥钢管桩属于海洋中固定式钢质结构,工作在浪溅区、水位变动区、水下区和泥下区等四大腐蚀区.通常海洋固定式钢结构划分为两大区域进行保护,即分为水上防蚀区和水下防蚀区.水上防蚀

区是平均潮水线以上各腐蚀区,该区由于不浸水或者浸水率低,一般以采用涂漆和被覆材料为主进行保护;水下防蚀区是平均潮水线以下各腐蚀区,该区域由于浸水率达 60%~100%,所以宜单独采用阴极保护技术进行保护,或者同时采用阴极保护技术和涂料联合保护.

为了确保东海大桥 100 年以上的有效使用年限,考虑到涂层水下更新涂装和维护,以及其耐久性有限,东海大桥钢管桩潮差区段采用环氧重防腐涂层与阴极保护的联合防腐技术措施,水下和泥下区段单独采用高效铝合金牺牲阳极保护.

从东海大桥建成至今的使用情况来看,钢管桩水下防蚀区完全裸露并单一采用牺牲阳极保护是有效的,年腐蚀率可大幅度降低至 0~0.03 mm/a.而施加牺牲阳极保护之后的钢管桩水上可见段亦尚未发现一丝锈迹,防蚀效果良好,如图 2 所示.



图 1 钢管桩水上可见段防腐效果图

5 结语

在海洋恶劣环境影响因素下,桥梁结构的耐久

性是跨海大桥寿命期内安全运营的关键问题. 东海大桥是中国第一座真正意义上的跨海大桥, 它的成功建设为外海桥梁耐久性的研究及应用提供了重要的技术支持与参考, 主要包括:

(1) 影响桥梁结构耐久性的因素是多方面的, 既有结构自身内在的因素如混凝土结构保护层厚度、水灰比等, 也有外在的环境因素如氯离子侵蚀、化学介质侵蚀破坏等, 此外结构的耐久性还与其施工工艺、质量有着密切的关系. 因此要实现外海桥梁结构在设计基准期内的安全运营, 就必须采用多层次的综合防腐体系, 把结构的耐久性措施贯穿到设计、施工过程中, 以确保规定的桥梁设计使用寿命.

(2) 跨海大桥混凝土结构耐久性技术措施主要是立足于混凝土材质本身的性能, 采用高性能海工混凝土, 以提高混凝土结构抗氯离子渗透的能力. 同时, 依据混凝土根据所处结构部位及使用环境条件, 采用必要的补充防腐措施, 如适当增大保护层厚度、提高混凝土密实度、降低水化热等.

(3) 跨海大桥水上钢结构部分可采用电弧喷铝长效防腐涂层体系, 使用寿命可达 50 年. 钢管桩耐久性技术措施可采用阴极保护和金属涂层联合保护的技术方案, 以阻止氯离子对钢结构的侵蚀.

(4) 东海大桥提高结构耐久性的综合防腐技术措施经实践应用证明是可行有效的.

参考文献:

- [1] Brain Shap. Durability of Concrete Structures in a Maritime Environment. CONCRETE, July/August, 1996, 12—15
- [2] 赵剑发, 苏祖平, 欧阳华林. C50 海工耐久混凝土配合比的研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 杨志方. 东海大桥防腐蚀需求与现状[J]. 世界桥梁, 2004, 增刊: 25—27.
- [4] 皇甫熹, 徐强, 俞海勇, 王琼. 高性能海工混凝土在东海大桥工程中的应用[J]. 世界桥梁, 2004, 增刊: 28—31.
- [5] 皇甫熹, 刘小方. 东海大桥打入桩基础耐久性研究与应用[J]. 世界桥梁, 2004, 增刊: 17—20.

The Design for Durability of the Long-span Bridge over Sea in its Full Life-span and its Construction Technology Countermeasure

HUANG YI, SUN Jian-yan, HUANG Shi-bo

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The durability of bridge structure is a key question of safety using during the full life-span of the long-span bridge over sea under the influence of atrocious surroundings of the sea. By analyzing the primary factors which influence the durability of the bridge over sea under the oceanic surroundings, the main approach and technical countermeasures which are in purpose of improving the structure durability are presented. Specifically, the design and construction technology countermeasures for the durability of Donghai Bridge's main concrete structures, steel structures and steel pipe piles are also summarized. And it's proved that the countermeasures are effective by testing results and using performance.

Key words: the design and construction of durability; long-span bridge over sea; the oceanic surroundings