

沿海混凝土桥梁工程的腐蚀环境评价 以及耐久性设计要求

石建光¹, 余志勇², 林挺宁³, 李 钢⁴

(1. 厦门大学 土木工程系, 福建 厦门 361005; 2. 广西珠委南宁勘测设计院, 广西 南宁 530007;
3. 厦门佰地建筑设计有限公司, 福建 厦门 361003; 4. 天津新滨工程技术检测有限公司, 天津 300301)

摘 要: 依据 JTG/T B07—01—2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》, 结合海南一个沿海混凝土大桥的具体环境条件和工程结构情况, 对大桥所处腐蚀环境评价中环境分区、环境作用分级以及耐久性设计要求等问题进行了研究。大桥的环境作用分为一般环境、土中环境、海洋环境和滨海环境四个区域。一般环境处于海南东北部沿海腐蚀偏高范围, 腐蚀性较高, 分级提高加以考虑。土中环境主要由于砖红壤地质腐蚀加重的影响, 在工程详细勘探和耐久性设计时给予关注。海洋环境由于海南炎热地区水温高、盐度高会加重腐蚀, 耐久性设计中给予考虑。滨海环境主要考虑海洋大气影响范围扩大、影响程度增高、海水入侵和盐渍化影响会不断扩大范围和程度等, 对滨海大气和滨海土壤环境的耐久性加以重视。在大桥的设计、施工的不同阶段贯彻和实施规范的技术措施是保证耐久性的关键, 对特殊形式和部位的构件和结构耐久性要给予专门措施。

关键词: 沿海环境; 混凝土桥梁; 环境分区; 环境作用分级; 耐久性设计

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2013)12-0067-05

Corrosion environment evaluation and durability design requirements of coastal concrete bridge

SHI Jianguang¹, YU Zhiyong², LIN Tingning³, LI Gang⁴

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Guangxi Nanning Investigation and Design Institute, the Pearl River Water Resources Commission, Nanning 530007, China; 3. Xiamen BIAD Architectural Design Co., Ltd., Xiamen 361003, China; 4. Tianjin New Coastal Engineering Testing Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: According to JTG/T B07—01—2006 “Specification for deterioration prevention of highway concrete structures” and GB/T 50476—2008 “Code for durability design of concrete structures”, The corrosion environmental classification, environmental action grade and durability design requirements of a coastal concrete bridge in Hainan province are researched combining the bridge environment condition and engineering structure. The environment condition of the bridge is divided into four districts: the general environment, soil environment, ocean environment and coastal environment. The general environment is placed in northeast coast of Hainan and belongs to higher corrosion scope. The corrosion is higher so the grade is exalted. The influence in soil environment mainly is the Latosols geology corrosion. At the detailed investigation and design this must pay attention because of in the south blazing hot region, the water temperature is high and the salt degree is high so the ocean environment will aggravate corrosion, the durability design must be considered. The coastal environment mainly considers the ocean atmosphere spread, increasing corrosion degree, the sea water invading and salinization. The durability of the coastal atmosphere and coastal soil environment should be attached importance to. At the different stage of bridge design and construction, the specialized technique measure is the key that promises durability. The special form and the part of bridge must carry out the specialized measure.

Key words: coastal environment; concrete bridge; environment classification; environmental action grade; durability design

0 引言

由于海洋、大气、土壤等环境条件和使用中的化学、酸雨等作用的不利影响, 大型混凝土工程的安全性会随时间显著降低从而危及工程安全^[1-3]。过去对部分海港码头、引桥、跨海桥的腐蚀状况进行的调查表明很多工程短期内就出现严重的腐蚀破坏(表 1)^[1-8]。据中国工程院

2002 年《中国工业与自然环境腐蚀问题的调查与对策》咨询报告, 预计我国因钢筋混凝土腐蚀造成的经济损失高达 1 000 亿元/年, 因此, 大型混凝土工程耐久性问题是新建工程必须解决的问题。本研究通过对海南一个沿海大桥所处腐蚀环境评价中环境分区、环境作用分级以及耐久性设计要求等问题的研究, 对沿海混凝土工程的耐久性设计提供参考。

收稿日期: 2013-06-09

表 1 海港码头、引桥、跨海桥的腐蚀状况

| 序号 | 名称 | 年限 | 腐蚀情况 | 经济损失 | 备注 |
|----|----------------|---|---|--------------|-----------|
| 1 | 华东华南 27 座海港、引桥 | 20 世纪 60 年代调查 | 其中腐蚀破坏占 74% | | 吴绍章等调查 |
| 2 | 华南 18 座海港码头、引桥 | 使用 7~25 年 | 其中腐蚀破坏 89% | | 洪定海等调查 |
| 3 | 22 座混凝土水闸 | 使用 7~15 年 | 其中腐蚀破坏 56% | | 童保全等调查 |
| 4 | 61 座混凝土水闸 | 使用在 23 年内 | 其中腐蚀破坏 87% | | 许冠绍等调查 |
| 5 | 连云港码头第一码头、引桥 | 使用 4~20 年 | 其中腐蚀破坏 84% | | 单国良等调查 |
| 6 | 湛江码头 | 1956 年建 1979 年检查(23 年) 1988 年检查(32 年) | 1963 年明显腐蚀破坏 并开始修复 ,1958 年 拆除 ,钢筋胀裂 91% | 拆除改良费数千万元 | 四航局研究院等调查 |
| 7 | 北仑港码头、引桥 | 1981 年建成 1987 年开始修复 | 钢筋胀裂 69%~100% | 仅宝钢就提供修复费数百万 | 中交四航局等调查 |

1 大桥环境调查

大桥位于文昌市东南角,横跨清澜湾,在现清澜湾轮渡码头附近,沿东西方向连接清澜镇与东郊镇,距离外侧海域约 4 km 左右,大桥两侧分别位于清澜镇的环球码头和东郊镇下东村(图 1)。



图 1 大桥位置

下东村一侧为海滩滩涂,环球码头一侧有混凝土码头和围堰。从环球码头一侧的混凝土裸露部位可以发现,暴露的钢管和钢筋腐蚀很严重(图 2),证明环境腐蚀作用很大。但只要混凝土完好,没有发现钢管和钢筋引起的锈蚀开裂等现象。

2 大桥工程概况

大桥设计方案采用主跨 300 m 的双塔双索面结合梁斜拉桥,跨径布置为 120 m+300 m+120 m(图 3)。设计行车速度为 80 km/h 的六车道一级公路(兼顾城市道路)。引桥跨径选择 40 m,西侧引桥立交段由于处于变宽段,跨径选择 30 m 左右。主线桥梁和引桥的走线和位置见图 4。

主线桥梁从 Z14 桥墩到 Z31 桥墩近 998 m 部分处于海水中。大桥的不同部分分别处于一般大气和土壤环境、海洋大气、海水和海洋地质及滨海等环境中,按耐久性设计要求对其环境分区和环境作用分别进行研究。

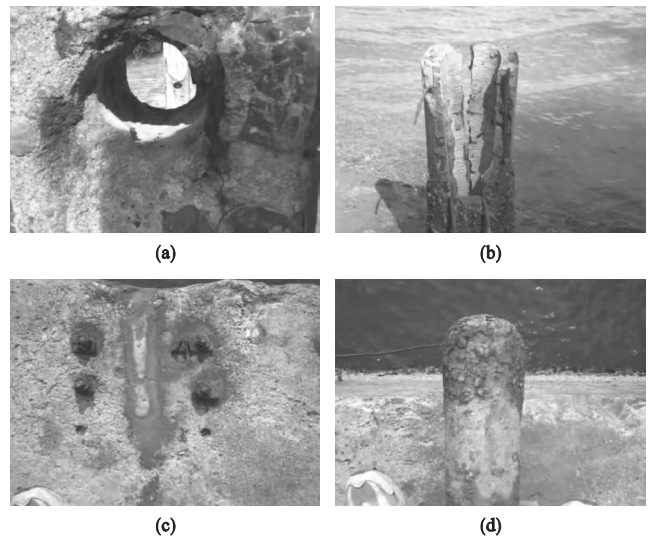


图 2 环球码头一侧裸露钢管和钢筋腐蚀情况



图 3 大桥效果图

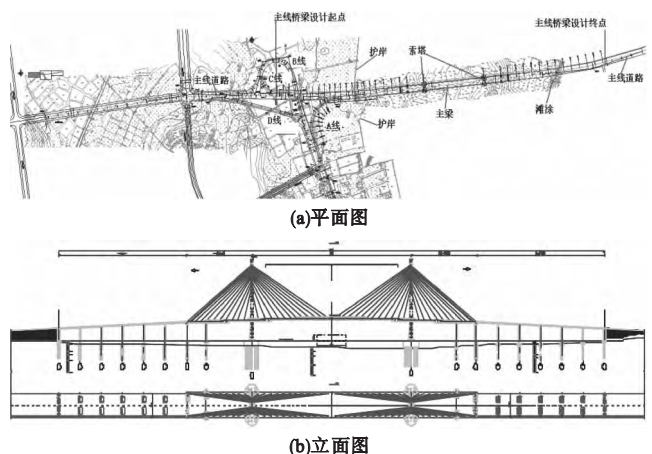


图 4 大桥主线桥梁和引桥的走线位置图

3 大桥环境分区

大桥的耐久性设计年限为 100 年。按 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》的环境类型划分,大桥腐蚀环境处于一般环境、氯化物环境和化学腐蚀环境中。按 JTG/T B07—01—2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》的环境类型划分,大桥腐蚀环境处于一般环境、近海或海洋环境、大气污染环境和土中及地表、地下水中化学腐蚀环境。在 JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技

术规范》中环境类型划分为大气区、浪溅区、水位变动区和水下区。

可以看出,大桥的不同部位分别处于大气环境、土中环境、海洋环境和滨海环境,为确定不同环境条件下大桥的耐久性指标,分别对大桥附近的大气环境、土中环境、海洋环境和滨海环境进行腐蚀性分析。

具体环境分区因工程对象不同和环境条件不同,在不同的规范中有不同的规定,按不同规范对大桥各部位的腐蚀环境分区如表 2。

表 2 大桥个部位的腐蚀环境分区的划分

| 状态描述 | 桥墩下部处于海水和海洋地质中,桥墩上部处于海洋大气中。 | 桥墩下部处于土壤地质中,桥墩上部处于一般大气中。 | 桥墩下部处于近海地质中,桥墩上部处于近海大气中。 | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| JTG/T B07—01—2006 《公路工程混凝土结构防腐技术规范》 | 海洋环境 | 一般环境 土中环境 | 近海环境 | |
| 桥梁范围 | 主线桥梁 桥墩 Z14~Z30 | 主线桥梁 桥墩 Z0~Z5 | 主线桥梁 桥墩 Z6~Z13 和 Z31~Z37 | 引桥 A 线 桥墩 A0~A8 |
| 使用年限 | 100 年 | 100 年 | 100 年 | |
| GB/T 50476—2008 《混凝土结构耐久性设计规范》 | 氯化物环境(海洋) | 一般环境 化学腐蚀环境 | 氯化物环境(滨海) | |
| 使用年限 | 100 年 | 100 年 | 100 年 | |
| 桥梁范围 | 主线桥梁 桥墩 Z14~Z31 | 主线桥梁 桥墩 Z0~Z2 | 主线桥梁 桥墩 Z3~Z13 和 Z32~Z37 | 引桥 A 线 桥墩 A0~A8 |
| JTJ 275—2000 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》 | 海水环境(大气区、浪溅区、水位变动区、水下区、泥下区) | 无 | 无 | |
| JTS 153—3—2007 《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》 | 海水环境(大气区、浪溅区、水位变动区、水下区、泥下区) | 无 | 无 | |
| GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》 以及 CEB 模式规范 MC-90 | 海水环境 受人为或自然的侵蚀性 物质影响的环境 | 露天环境 受人为或自然的侵蚀性 物质影响的环境 | 滨海室外环境 受人为或自然的侵蚀性 物质影响的环境 | |

针对大桥各部位所处的腐蚀环境特点,依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》,把环境作用分为一般环境、土中环境、海洋环境和滨海环境四个区域进行环境作用分析。一般环境主要考虑大桥陆地周围大气环境作用。土中环境主要考虑大桥陆地范围内地下土壤环境作用。海洋环境主要针对大桥主体部分所处的海洋大气、海水、海洋地质环境作用。滨海环境主要考虑大桥受海洋大气和海水影响的陆地范围内大气和土壤环境作用。通过分析各种环境的腐蚀危害程度,调查和测试不同环境的腐蚀因素,确定各个区域的主要腐蚀影响,划分各个区域的环境作用等级,对耐久性设计和施工提供技术指标和措施。

4 环境作用分析和测试

(1)一般环境。一般环境主要指主线桥梁从桥墩 Z0 到桥墩 Z5 范围的大气环境。大气环境腐蚀性的定性评价主要依据气温、湿度、腐蚀介质这 3 个方面进行分类。目前对

大气环境腐蚀性分类分级的规范方法有用潮湿和污染物作用时间进行环境分类方法和根据腐蚀速率及标准金属试样测定的分类。而定性分类方法有标准试样法、环境因素监测法、腐蚀变量法 3 种。

我国 GB/T 15957—1995《大气环境腐蚀性分类》采用根据腐蚀速率及标准金属试样测定的分类方法。依据海南万宁、琼海进行的大气腐蚀测试结果判断,大气腐蚀属于 III 类轻腐蚀区,考虑大桥受海洋大气影响,而且长期会有加重的趋势,过去对海南大气腐蚀的调查也证实海南大气腐蚀比较严重。确定大桥附近的大气为 IV 类中腐蚀区。按国际标准 ISO 9223 的 5 级划分,海南大气腐蚀等级属于 3 级,东北部沿海属于 4 级,是腐蚀偏高的地区。琼海和文昌环境条件基本相同,属于腐蚀较重区域。故大桥的大气腐蚀应该给予重视。

依据全国降水 pH 分级和海南污染物监测,大桥可以不考虑酸雨和其他空气污染物的腐蚀影响。从现场已有混凝土码头进行的混凝土碳化深度测试发现,经过多年使用后的混凝土碳化很小,可以不考虑大气中二氧化碳的影响。

依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》中一般环境和大气腐蚀环境分类分级,大桥的一般环境可以确定为 C 级。而依据 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》中一般环境作用的分级,大桥的一般环境可以确定为 I-C 级。

综合以上一般环境腐蚀因素的影响和分析,大桥的一般环境作用应该在规范分级基础上给予提高,以便考虑这一地区腐蚀加重的影响。故可以按 D 级考虑。

(2)土中环境。土中环境主要指主线桥梁从桥墩 Z0 到桥墩 Z5 范围的土壤地质环境。土壤腐蚀性评价及分级有采用失重法和最大孔蚀深度法的评价,海南文昌等地区多是砖红壤土质,砖红壤酸性强,结构疏松,全氮量高,对 Q235 钢腐蚀较重,而部分沙壤土质,呈中性,结构紧密,全氮量低,腐蚀较轻。

依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》中化学腐蚀环境分类及作用等级和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》中水、土中硫酸根和酸类物质环境作用等级以及单项或多项指标评价看出表层土的腐蚀性很弱。

综合以上分析和测试可以确定土中环境可以不考虑化学腐蚀作用或硫酸根和酸类物质环境作用。土壤的腐蚀性分级可按 C 级,而且对土壤腐蚀应该给予重视,在进行地质勘探时加强土壤腐蚀性调查,为防腐蚀设计提供依据。

(3)海洋环境。海洋环境主要指主线桥梁从桥墩 Z14 到桥墩 Z30 范围的海水、海洋地质和海洋大气环境。

在大桥所处位置海域进行现场取样和现场 pH 值测试。pH 值测试结果表明 pH 值在 7~8 之间。现场海水取样测试结果现场土样测试结果,从以上测试结果可以看出,不论海水还是滨海盐土都有较强的腐蚀性。

结合大桥所处海洋环境的调查分析和测试,比较发现 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》对土中和水中的分级比 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》降低,但结合大桥所处海洋环境的腐蚀性分

析,水中和土中的腐蚀性比较严重,应该按 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》的分级比较接近现场环境。最终的海洋环境分级如表 3 所示。

表 3 大桥所处海洋环境的腐蚀性分级

| 位置 | 海洋大气环境 | 水中 | 土中 |
|----|--|-----|-----|
| 分级 | D 级(16.7 6m 标高以上), E 级(3.26~16.76 m 之间), F 级(0.76~3.26 m 之间) | D 级 | D 级 |

(4)滨海环境。滨海环境主要指主线桥梁从桥墩 Z6 到 Z13 和从 Z31 到 Z37 以及引桥 A 线桥墩从 A0 到 A8 范围的滨海土壤和滨海大气环境。

滨海大气受海洋大气中氯离子的影响,腐蚀加重,氯盐离海洋距离不同的浓度变化。大桥地处海南东北部沿海地区,故其滨海大气腐蚀的距离应该考虑更远范围。

滨海土壤要考虑海水入侵和盐渍化影响。按海水入侵化学观测指标与入侵程度等级划分指标,海南三亚市田独镇轻度海水入侵距岸 0.5 km 范围内,矿化度为 1.20 g/L,严重入侵距岸 0.25 km 范围内,矿化度为 4.67 g/L。

国家海洋监测结果显示,南方滨海地区海水入侵面积小、盐渍化程度低。大桥的滨海土壤距离范围应该按 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》考虑,如果考虑大桥耐久性设计年限比较长,其滨海土壤范围应该考虑更远范围。

综上所述,滨海环境的分级可以与海洋环境分级相同,但考虑范围应该以 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》确定。

5 环境作用分级

通过对大桥的一般环境、土壤环境、海洋环境和滨海环境腐蚀性分析和分级判断,比较 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》的环境作用分级,结合大桥的环境条件和工程设计方案,最终确定的环境作用分级如表 4 所示。

表 4 大桥环境作用分级

| 大桥范围 | 主桥桥墩 Z0~Z2 | | 主桥桥墩 Z3~Z13 和 Z32~Z37 | | 引桥桥墩 A0~A8 | | 主桥桥墩 Z14~Z31 | | |
|--------|------------|-------|-----------------------|-------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|--|
| 环境作用分类 | 一般环境 | 土中环境 | 滨海环境 | | | 海洋环境 | | | |
| 环境作用分区 | 陆地大气区 | 陆地地下 | 接触空气中盐分的陆地大气区 | 海水渗入影响的陆地地下 | 接触空气中盐分,不与海水直接接触的大气区 | 接触空气中盐分,与海水直接接触的大气区(重度盐雾) | 浪溅区、潮差区 | 浸没于海水的水下区、海泥区 | |
| 工程部位 | 箱梁、桥墩 | 桩基、承台 | 箱梁、桥墩 | 桩基、承台 | 箱梁、桥墩、上塔柱 | 桥墩、下塔柱 | 桩基、承台 | 桩基、承台 | |
| 环境作用分级 | D 级 | D 级 | E 级 | D 级 | D 级 (16.76 m 标高以上) | E 级 (3.26~16.76 m 之间) | F 级 (-0.78~3.26 m 之间) | D 级 | |

6 耐久性设计技术

耐久性设计技术包括采用有利于减轻环境作用的结构形式、布置和构造,钢筋的混凝土保护层厚度,混凝土结

构材料的耐久性质量要求,混凝土裂缝控制要求,防水、排水等构造措施,严重环境作用下合理采取防腐蚀附加措施或多重防护策略,耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求,结构使用阶段的维护、修理与检

测要求。

依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》结合当地的具体环境条件和工程结构情况,针对大桥环境作用分区、分级,总结耐久性设计技术的规范要求和工程实践,保证或提高混凝土结构耐久性的技术措施主要有:

(1)提高材料性能,措施包括:选择合适材料,如控制所用水泥 C_3A 的含量,较好的粗细集料,控制水灰比、水泥用量与粗骨料,化学添加剂,如阻锈剂等,改进钢筋材质,如采用环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋、镀锌钢筋,高性能混凝土,主要通过掺入粉煤灰、高炉矿渣、微硅粉中的一种或多种,使得混凝土材料有高弹性模量、低渗透、低缺陷、高密实等性能;表面涂层,改善施工操作方法,如采用织物模板,由玻璃鳞片和耐腐蚀热固性树脂构成的鳞片涂料,以粉末熔融成膜的粉末涂料,在海洋环境中常用的混凝土防腐涂层有环氧煤焦油、高性能环氧一至二道、聚胺酯弹性内衬、乙烯热塑内衬、聚酯或环氧树脂等。

(2)设计与施工因素,措施包括:提高混凝土保护层厚度,构件外形改进,如尽量不具尖角和凸缘,水中迎击水流的形状应尽可能的采用流线形,提高施工质量。

(3)保证或提高钢结构耐久性的技术措施有:牺牲厚度法、各种热喷涂方法、阴极保护法和改用特殊钢材的方法。

(4)对于特殊部位的构件要结合具体构件情况采取有效的耐久性措施。钻孔灌注桩的耐久性措施:由于钻孔灌注桩的混凝土靠自重压密,因此其密实性难以与经过振捣密实的混凝土相比,为增加钻孔灌注桩的防腐性能,可适当增大钢筋保护层的厚度(至少为 75 mm),并在灌注桩上部采用掺合料提高混凝土的密实度。保留施工用钢护筒作为钻孔灌注桩桩顶以下一定范围的一道防腐屏障,并对钢护筒外表面采取适当的涂料防腐措施。承台与墩柱耐久性措施:位于潮差区、浪溅区的承台及墩柱将遭受比较强烈的腐蚀作用。可以采用措施:适当的混凝土保护层厚度,如参考东海大桥,钢筋保护层厚度不小于 80 mm。大桥的承台和墩柱高性能混凝土采用掺加矿渣微粉和粉煤灰为主的优质矿物掺合料。有效控制这部分混凝土表面在施工期产生的微裂缝,从而改善整体耐久性能。

7 总结和建议

依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》结合当地的具体环境条件和工程结构情况,在规范的基础上进行具体调整和补充是进行这项工作的基本思路。通过分析研究,得出如下结论:

(1)大桥的环境作用分为一般环境、土中环境、海洋环境和滨海环境四个区域。一般环境主要考虑大桥陆地周围大气环境作用。土中环境主要考虑大桥陆地范围内地下土壤环境作用。海洋环境主要针对大桥主体部分所处的海洋大气、海水、海洋地质环境作用。滨海环境主要

考虑大桥受海洋大气和海水影响的陆地范围内大气和土壤环境作用。

(2)大桥的环境作用的分级和工程范围。一般环境处于海南东北部沿海腐蚀偏高范围,腐蚀性较高,分级提高加以考虑。土中环境主要由于砖红壤地质腐蚀加重的影响,在工程详细勘探和耐久性设计时给予关注。海洋环境由于海南炎热地区水温高、盐度高会加重腐蚀,耐久性设计中给予考虑。滨海环境主要考虑海洋大气影响范围扩大、影响程度增高、海水入侵和盐渍化影响会不断扩大范围和程度等,对滨海大气和滨海土壤环境的耐久性加以重视。

(3)大桥的耐久性设计技术主要针对不同环境作用等级对应的工程部位,依据 JTG/T B07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐技术规范》和 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》对应的技术措施,在设计、施工的不同阶段,采用有利于减轻环境作用的结构形式、布置和构造,钢筋的混凝土保护层厚度,混凝土结构材料的耐久性质量要求,混凝土裂缝控制要求,防水、排水等构造措施,严重环境作用下合理采取防腐附加措施或多重防护策略,耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求。贯彻和实施规范的技术措施是保证耐久性的关键。

(4)对特殊形式和部位的构件和结构耐久性要给予专门措施,如后张预应力混凝土结构、钢结构、钻孔灌注桩、潮差区和浪溅区的承台及墩柱等。

通过对大桥环境作用的分析研究,加深了对大桥环境作用的了解和理解,为做好大桥的经济性、安全和耐久性,建议开展使用阶段的维护、修理与检测技术研究,加强环境作用监测,提高大桥的技术水平。

参考文献:

- [1] 洪定海.混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M].北京:中国铁道出版社,1998.
- [2] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[J].北京:科学出版社,2002.
- [3] 洪乃丰.钢筋混凝土基础设施腐蚀与耐久性[C]//混凝土结构耐久性及耐久性设计会议论文集.北京:清华大学,2002.
- [4] 董保全,王硕威.浙东沿海水工钢筋混凝土构筑物锈蚀破坏调查[J].水运工程,1985(11).
- [5] 潘琳,吕平,赵铁军,等.海工钢筋混凝土的腐蚀与防护[J].全面腐蚀控制,2006(1).
- [6] 周履.20世纪后期海洋混凝土结构抗腐蚀性能的发展[J].世界桥梁,2004(4).
- [7] 吴壮佳,姚学昌.浅谈沿海地区硅构造物腐蚀原因及防护措施[J].广东公路交通,2002(3).

作者简介:石建光(1962-),男,教授。

联系地址:厦门市思明区思明南路422号,厦门大学土木工程系(361005)

联系电话:13950006094