

跨海大桥 RC 桥墩防腐研究进展

张利铨^{1,3}, 林上顺², 陶志蕾², 张朝阳³, 江 星⁴

(1. 平潭综合实验区投资发展有限责任公司, 福建 平潭 350400;

2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室(福建工程学院), 福建 福州 350118;

3. 清华大学 土木工程系建筑材料所, 北京 100084;

4. 福建省榕圣市政工程股份有限公司, 福建 福州 350002)

摘 要: 跨海大桥墩柱腐蚀问题日益严重, 为提高跨海大桥桥墩的耐久性, 在收集大量实桥资料和相关研究的基础上, 对跨海大桥桥墩的腐蚀现象、被腐蚀的诱因、常用的防腐蚀措施等进行综述和分析, 结果表明: 现有的跨海大桥桥墩混凝土的腐蚀现象严重, 耐久性需得到进一步提高; 桥墩的防腐蚀措施研究已经取得一些进展, 但在产业化推广方面, 仍需要进一步开展研究; 与传统的混凝土防腐蚀措施相比, 向混凝土添加防腐剂的措施、在经济性、施工便利性等方面, 具有明显的优越性, 是今后跨海大桥桥墩防腐蚀研究的重点。对今后开展跨海大桥 RC 桥墩防腐蚀研究具有参考价值。

关键词: 桥梁工程; 桥墩; 防腐蚀; 跨海大桥; 外加剂

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0177-07

Research Progress on Corrosion Protection of RC Piers of Sea Crossing Bridges

ZHANG Liqueun^{1,3}, LIN Shangshun², TAO Zhilei², ZHANG Chaoyang³, JIANG Xing⁴

(1. Pingtan Comprehensive Experimental Zone Investment Development Co., Ltd., Pingtan, Fujian 350400, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering,
Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

3. Institute of Building Materials, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

4. Limited Company of Fujian Rongsheng Municipal Engineering, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Corrosion of sea-crossing pier columns is becoming more and more serious all over the world. In order to improve the durability of piers of sea-crossing bridge, a large number of actual bridge data and relevant research was collected to summarize and analyze the corrosion phenomena of pier of sea-crossing bridge, the causes of corrosion and the commonly used corrosion protection measures. The results are as follows. Some existing sea-crossing bridge piers are corroded seriously, therefore the durability of sea-crossing bridges needs to be further improved. Some progress has been made in the research on anti-corrosion measures, but further research is still needed in industrialization promotion. Compared with the traditional concrete anti-corrosion measures, the measures of adding preservatives to concrete have obvious advantages in economy, construction convenience and so on. The internal addition of additives for concrete anti-corrosion is the focus of future anti-corrosion research on piers of sea-crossing bridges. The analysis has reference value to the future research on corrosion protection of sea-crossing RC peers.

Keywords: bridge works; pier; anti corrosion; pier of sea crossing bridge; admixture

跨海大桥的腐蚀问题已经成为影响结构耐久性的突出问题之一。如澳大利亚新南威尔士 Eurobodalla 郡委员会对其管辖的 18 座混凝土桥梁进行监测时发现,其中靠近海滨的 4 座桥的桥墩由于受到氯离子侵蚀,混凝土出现开裂,其中一些墩柱的腐蚀严重,出现混凝土胀裂和分层破坏^[1]。位于台湾省的澎湖跨海大桥使用 7 年后出现了梁、板、柱顺筋开裂,失去保护作用,造成其腐蚀问题,仅使用 17 年之后,该桥就因腐蚀破坏问题过于严重,承载力大幅降低,达不到使用要求被迫拆除重建。

与桥梁上部结构相比,跨海大桥桥墩的腐蚀问题更为突出,主要表现为混凝土保护层剥落以及钢筋锈蚀等病害^[2-4],例如连接我国广东省珠海市情侣路与野狸岛的海燕大桥,其桥墩由于出现大量的钢筋锈蚀膨胀、保护层剥离等问题,最终不得不采用限载通行措施^[5]。一些跨海大桥的主梁仍具备足够的承载能力,然而其桥墩由于受到海洋环境的严重腐蚀,从而导致桥墩的承载能力下降较快,甚至存在桥梁垮塌的风险^[6]。跨海大桥一般处于交通咽喉要道,一旦出现垮塌,将对沿海、近海及岛屿经济产生严重负面影响。从近些年来我国跨海大桥的桥墩病害的普查数据看,其桥墩的耐久性问题日益严重,因此出现的大量危桥以及与之配套的桥梁养护费用十分昂贵。

由于海水冲刷、浸泡,以及大气腐蚀等原因,跨海大桥的钢筋混凝土桥墩容易受到氯离子侵蚀,导致其耐久性迅速劣化甚至出现结构破坏。国内外工程技术人员及科研人员针对跨海大桥的桥墩腐蚀问题,已经开展大量研究^[7-12],并采取一些防腐蚀措施,如采用高性能混凝土、合理增加保护层厚度、外刷防腐涂层、应用阻锈剂、外加阳极的阴极保护技术等。然而,既有的措施仍存在费用高昂、后续养护操作困难等问题,因此进一步开展跨海大桥桥墩防腐蚀相关研究,对跨海桥梁建造的安全性、耐久性、经济性具有重要意义。为此,本文在收集国内外相关资料的基础上,对跨海大桥 RC 桥墩的腐蚀机理及防腐措施研究现状进行综述,并对今后的研究进行展望。

1 跨海大桥混凝土桥墩腐蚀现象分析

20 世纪 90 年代以前,我国沿海地区修建的大量中小跨径钢筋混凝土桥梁,由于腐蚀等问题,承载力不足,部分桥梁面临倒塌问题。位于山东威海的双岛海湾公路大桥,在公路桥梁检测中心对该桥进行全面检测时,发现位于海水潮汐区、浪溅区的墩柱

由于长期受到海水侵蚀,该区域局部已出现混凝土脱落、钢筋严重锈蚀的现象^[1]。此区域其它钢筋混凝土桥梁,由于氯盐、冻害等侵蚀原因,在投入使用后不久,混凝土保护层就出现严重的开裂和剥落的情况,钢筋锈蚀情况严重,虽然对其进行了加固维护,但在两三年后仍出现较为严重的腐蚀破坏问题,甚至有些桥梁的承载力低于使用要求,需要拆除重建^[1]。几种常见的桥墩腐蚀如图 1 所示^[13]。

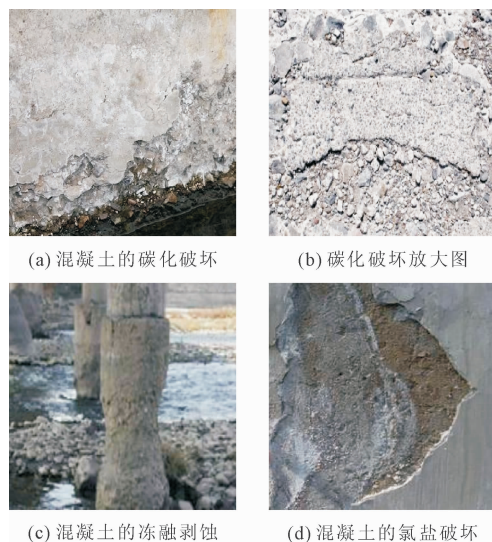


图 1 常见的混凝土腐蚀图

位于广东省珠海市的海燕大桥(见图 2)于 1995 年建成通车,2003 年养护时发现该桥梁的桥墩发生了部分混凝土剥离,混凝土主筋锈蚀严重以及大量的钢筋锈胀裂缝,而箍筋亦锈蚀断落,基本上丧失了原有作用^[2];采用双柱式桥墩的灵昆大桥(见图 3)于 2002 年竣工通车,在 2007 年维护检测时下部结构发现了严重腐蚀破坏,桥墩的盖梁与分桩基础位置均出现了较为严重的混凝土剥落、钢筋锈蚀暴露等问题^[14];石门大桥(见图 4)于 1985 年建设完成,是一座跨越出海口河流的双幅分离式大桥,受海水侵蚀锈蚀病害较严重,全桥有 65 处墩柱底部(占总墩柱的 45.1%)存在胀裂、露筋现象,部分墩柱底部混凝土几乎完全剥落。盖梁发生剥落露筋病害数量占总盖梁数量的 41.2%,最严重的病害面积达总面积的 40%,已危及行车安全^[15];位于海南海口的世纪大桥于 2003 年通车,于 2013 年检修时发现,桥墩多处出现了不同长度、深度的裂缝,在接近海甸岛的北引桥桥墩部位也出现了一些裂缝。

于 2008 年通车运营的杭州湾跨海大桥(见图 5),在 2014 年对其进行损伤评定中发现每个桩基表面都有裂缝(最大裂缝深度可达 5 cm,最大长度可

达 220 cm)、每根桩基混凝土都有轻微腐蚀损伤(腐蚀深度 3 cm),D13 主桥墩腰部收窄处淤长,桥墩南侧较北处槽冲刷痕迹明显,各个测次的冲刷坑形态基本一致(见图 5),但历年河床冲刷深度均未超过设计河床冲刷线,所以没有发生基础冲刷损伤^[16]。



图 2 海燕大桥腐蚀图片



图 3 灵昆大桥腐蚀图片

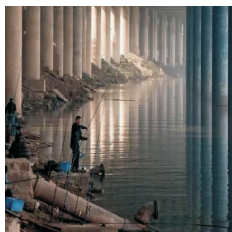


图 4 石门大桥桥墩腐蚀图



图 5 杭州湾大桥 D13 墩柱

福建省境内的下白石特大桥的 40 根墩柱中 10 根存在病害,表面混凝土出现露筋、留白和麻面等现象 20 处,部分地区出现保护层厚度不足等问题(见图 6);浅水位置墩柱有微生物侵蚀的现象。福建省内的杨家溪特大桥桥墩存在混凝土露筋、麻面以及凹槽等病害问题;钢筋锈蚀导致混凝土表面剥落、钢筋外露、孔洞等问题;局部混凝土保护层面积不足;局部混凝土保护层厚度不足,河床存在冲刷现象(见图 7)。



图 6 下白石特大桥墩柱腐蚀图



图 7 杨家溪特大桥墩柱腐蚀图

我国是氯盐大国,混凝土结构的耐久性问题日益严重。桥墩腐蚀表现形式大致为局部混凝土保护层面积不足、钢筋锈蚀导致混凝土表面剥落、钢筋外露、孔洞、混凝土剥落等。耐久性不足经常导致结构损坏事故,包括混凝土碳化和钢筋腐蚀,造成无法估量的损失^[9]。综上所述,分析钢筋混凝土桥梁结构

耐久性影响因素,并针对性地采取有效防护措施,已成当前急需解决的问题。

2 混凝土桥墩腐蚀的诱因分析

海水是一种包含 80 多种化学元素的复杂混合液体,其中氯、钠、镁、硫、钙、钾、溴、碳、锶、硼、硅、氟等 12 种元素占主要部分,且其离子浓度比值保持相对稳定。海水中主要盐分含量约为 35 g/kg,且不同盐类的含量相差较大,氯化物含量最高,硫酸盐含量次之,两者之和共占海水中盐类含量的 99.7%^[4]。

2.1 混凝土腐蚀

混凝土本身是一种兼有气、液、固三相的非匀质多孔物质,其内部具有许多几纳米到几毫米的孔隙。水分以及侵蚀性的介质可以通过这些空隙和裂缝进入混凝土内部,从而腐蚀混凝土材料本身以及混凝土中的钢筋。混凝土材料本身的腐蚀可分为物理腐蚀、化学腐蚀以及微生物腐蚀三个方面。

物理腐蚀包括冻融破坏、磨损、冲刷等。冻融损伤的表现形式均为混凝土表面出现剥落,甚至是粗骨料外露,混凝土力学性能显著降低。影响混凝土抗冻性的因素有:相同条件下的水泥品种、骨料性能、密实度、强度等级、孔隙结构和数量、孔隙填充度、水灰比和体积混凝土结构,混凝土构件体积越小,越容易发生冻融破坏。混凝土桥墩长期受海水冲刷,长期处于高负荷工作状态,致使混凝土桥墩表面出现裂纹或裂缝,破坏了其表面保护层,加剧了混凝土桥墩的腐蚀^[17]。

化学腐蚀包括碳化、碱骨料反应、氯离子侵蚀、硫酸盐腐蚀等,混凝土桥墩处于溶有大量钠离子、氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子以及微生物的海水中,在水化过程中水泥会形成大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,呈碱性。空气中的 CO_2 气体会穿透混凝土结构,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 产生化学反应,降低混凝土本身的碱度,这一过程被称为混凝土的碳化^[5,18],如图 8 所示,当碳化深度超过混凝土保护层时,钢筋就容易腐蚀。

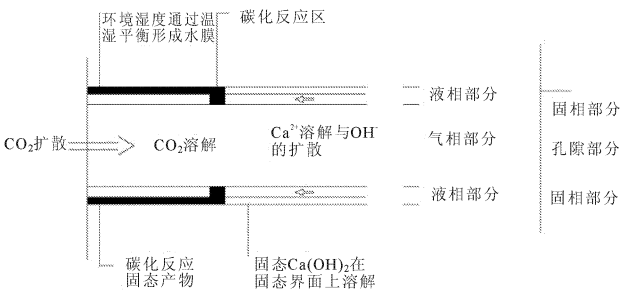


图 8 混凝土的碳化

硫酸盐腐蚀的表现形式与冻融损伤类似。从硫

酸根离子的来源看,混凝土的硫酸盐腐蚀可分为内部和外部侵蚀。内部侵蚀是由于混凝土组分本身带有的硫酸盐引起的,不经过扩散即可与水泥石中的矿物发生侵蚀反应,而硫酸根离子的量随反应的进行而减少,因此侵蚀速率则随母体龄期增长而趋于降低。而外部侵蚀是海洋环境中的硫酸盐对混凝土的侵蚀^[19-20],这是一个扩散过程,其速率决定于混凝土的抗渗性。

混凝土的微生物腐蚀是指微生物代谢引起的混凝土腐蚀,会导致表面污染、表面疏松、砂浆脱落和钢筋混凝土骨料外露,严重时可能造成裂缝和钢筋腐蚀,缩短钢筋混凝土设施的使用寿命,目前国内对其研究较少^[5]。

2.2 钢筋锈蚀

混凝土中钢筋的锈蚀属于电化学腐蚀,其腐蚀机理如图 9 所示。当 $\text{pH} < 11.5$ 时,钢筋表面的钝化膜开始不稳定;当 $\text{pH} < 9.0$ 时,其钝化膜开始逐渐被破坏,氯离子开始进入混凝土,到达钢筋表面后导致钢筋生锈。氯离子首先在相对较小的区域内破坏钝化膜,形成一个小阳极,与未破坏的钝化膜产生电位差,形成腐蚀电池,导致腐蚀发生外延^[21-23]。大量试验的结果表明:在干湿循环作用下,混凝土表面氯离子含量显著增加,且氯离子在混凝土中的扩散速度更为迅速^[5,24-29],从而导致钢筋更容易受到腐蚀。

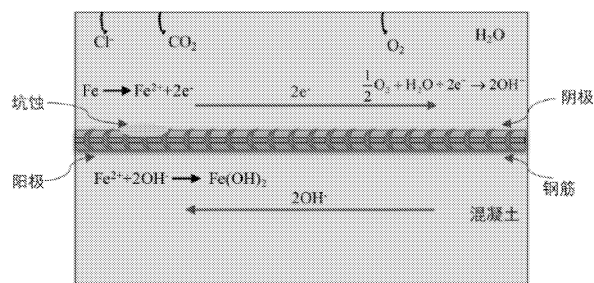


图 9 钢筋锈蚀机理

3 跨海大桥混凝土桥墩常用的防腐措施

3.1 桥墩混凝土结构设计优化

提高混凝土桥墩防腐能力的根本措施是减少海洋环境中腐蚀介质进入混凝土桥墩结构物的内部,在最大程度上保证与海洋环境中的介质发生最少的反应,而实现这一目标的关键是提高混凝土桥墩结构物的密实度和抵抗裂纹、裂缝发生的能力。我国跨海大桥(如港珠澳大桥、杭州湾跨海大桥、青岛跨海大桥等)的防腐设计,多采用以抗氯离子渗透系数为主要指标的原则,主要措施包括采用高性能混

凝土、合理增加保护层厚度、设置防腐涂层等,辅以其他防腐措施(如钢筋防腐等),构成符合其设计要求的防腐体系。

3.1.1 高性能混凝土

高性能混凝土(HPC)是一种采用传统材料,传统工艺,常温低水胶比以及高性能减水剂,严格控制具有高耐久性、高体积稳定性和高强度的水泥混凝土。屠柳素等^[30]、赵亚丽^[31]、迟培云等^[32]研究了海工混凝土的制备方法,并分析了不同矿物掺量、不同减水剂用量等对海工混凝土耐腐蚀性能的影响。我国杭州湾跨海大桥、东海大桥等,均根据不同的结构部位、设计要求和腐蚀环境,混凝土采用不同的配合比设计^[33]。东海大桥也采用了添加矿物掺料、减水剂等措施,提高混凝土的耐久性^[34]。

3.1.2 合理增加混凝土结构物的表面保护层厚度

合理增加混凝土结构物的保护层厚度,可阻止或减缓的氯离子进入混凝土结构物内部,延长氯离子到达钢筋表面的时间。王建^[35]、徐善华等^[36]、马建慧等^[37]对混凝土保护层厚度的合理取值范围进行研究,提出了钢筋混凝土结构、混凝土异形柱的最小保护层厚度。相关研究对国内已建的一些跨海大桥,如东海大桥、杭州湾跨海大桥、青岛海湾大桥、港珠澳跨海大桥、泉州湾跨海大桥等混凝土厚度等方面均有一定的研究指导作用。

3.1.3 混凝土表面涂刷防腐涂层

防腐涂层能够在混凝土基底的表面上形成一层重量轻、连续致密的薄膜,这层薄膜具有防潮、防渗、防水的功能,能够有效地隔绝海水中容易对混凝土产生腐蚀的介质。根据混凝土高碱、高湿、高孔隙率的特点,涂料必须具有耐碱、耐水、耐浸泡、耐候性好的特点,混凝土外表面涂料可分为刚性涂料和柔性涂料。

(1) 混凝土外表面刚性涂层。传统的混凝土防护材料包括环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸树脂、氯化橡胶、乙烯基树脂等,但传统的混凝土防护材料存在抗碱性、附着力低、耐久性差,施工困难等问题。新型涂料可分为有机涂料和无机涂料。有机涂料不仅能防止水在混凝土中的渗透和扩散,又有利于混凝土内部的水向外部消散。无机材料覆盖层与有机成膜原理不同,其透气性好、耐污染、环保性好,该涂料,具有不助燃、耐酸碱等显著特点^[38]。

(2) 混凝土外表面柔性涂层。从 20 世纪 90 年代起,随着有机硅技术的发展,新型有机硅材料已被广泛应用于防水、防腐蚀和保护等领域。何晓雁等^[39]在 C30 混凝土试件表面涂敷 JS-II 型复合防

水防腐涂料进行抗渗、抗冻的对照试验,试验结果表明 JS-Ⅱ型复合防水防腐涂料对普通混凝土的耐腐蚀性、抗渗性和抗冻性有一定的改善作用。韩建军等^[40]研究了改性纳米 SiO_2 + 有机成膜涂层对混凝土耐久性的影响,结果表明:改性和未改性纳米 SiO_2 可以有效改善涂层混凝土的抗碳化性能,混凝土耐久性得到较好的提高;党俐等^[41]以有机硅单体和丙烯酸乙烯酯为活性单体,通过化学改性,合成了一种新型混凝土防护涂料。

现阶段在我国跨海大桥中应用较为广泛的措施为外刷防腐涂层,如上海东海大桥混凝土外表面涂环氧涂层,对某些部位还复合采用保护层^[34];港珠澳大桥采用表面涂硅烷浸渍进行防腐^[42];杭州湾跨海大桥位于浪溅区的桥墩表面外涂三层热熔环氧粉末涂料,潮差区和水下区的桥墩外涂双层热熔环氧粉末涂料,位于泥下区的钢管桩采用单层热熔环氧粉末涂层^[33]进行防腐。但对于防腐涂层而言,一旦其受到丝毫破坏,该涂层的防护作用将不再起作用,所以要定期补刷防腐涂层,后期养护费用较大。

3.2 桥墩混凝土采用防腐外加剂

混凝土防腐剂目前国内外研究的主要有混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂、硅烷浸渍防护、疏水化合孔栓物、硅烷类疏水剂等。崔巩等^[43]通过实验对疏水化合物影响混凝土工作性能、力学性能、抗渗性能、水化放热及收缩变形性能的规律进行研究;周华新等^[44]通过研究疏水孔栓化合物对 C40 混凝土性能的影响,发现可极大提高混凝土耐久性,并将其在虎门二桥承台结构进行了工程应用,施工反馈良好。Feng 等^[45]的研究结果表明:内掺硅烷乳液能够保护裂缝中的镀锌钢筋免受腐蚀,水灰比越大作用越明显。与传统的防腐混凝土相比,防腐混凝土具有防腐、耐久、保护钢筋、减少施工环境限制和施工维护便捷等优点,经济成本高,且后期保护成本相对较低。

3.3 桥墩钢筋的防腐措施

3.3.1 阴极保护法

阴极保护的原理是为阴极提供电子人为构造一个外部阳极,牺牲阳极是根据电镀原理,利用活性金属作为原电池阳极的一种方法。外加电流法是利用外部电源,向钢筋内连续输入电子,钢筋始终处于稳定状态。在实际工程中广泛使用的主要是外加电流法。姜言泉等^[46]在青岛海湾大桥采用了外加电流法,对新结构和旧结构都起到很好的腐蚀控制作用;任敏等^[47]设计了循环水系统和混凝土试块模型,模拟钢筋混凝土海洋腐蚀状态,采用外加电流阴极保护技术对模型进行持续阴极保护。我国的港珠澳大

桥及杭州湾大桥也采用了这种保护法^[33,42]。

3.3.2 涂层钢筋

目前国内外采用较多的钢筋防腐涂层是环氧树脂涂层和镀锌涂层,这两种涂层不仅与钢筋粘结力较强,其抗腐蚀能力也较优秀。王仁贵^[33]、陈锦虹等^[48]、李延涛等^[49]通过实验阐述了热浸镀锌钢筋抵抗腐蚀的优越性及其发展前景,进行预应力钢筋混凝土梁的静载及疲劳试验,对比和分析不同耐腐蚀钢筋的抗侵蚀效果,并在杭州湾跨海大桥采用环氧涂层钢筋。与混凝土表面外刷防腐涂层类似,钢筋表面涂刷与钢筋紧密贴合粘结的钢筋防腐涂层可以防止水、氯化物、氧气和二氧化碳等侵蚀介质腐蚀钢筋,是一种比较简便、经济、有效的保护措施,但其能达到的防腐能力有限,往往作为一种辅助性措施,与其他措施配合使用。

3.3.3 耐腐蚀钢筋

涂层钢筋是一种普通碳素钢筋表面覆盖的防腐材料,而耐腐蚀钢筋自身具有耐腐蚀的性能,目前主要有不锈钢钢筋和纤维塑料筋两种,目前相关研究仍处于起步阶段。我国港珠澳跨海大桥、香港的昂船洲大桥以及深圳西部通道大桥均采用了不锈钢筋^[50]。在不锈钢筋的制备方面,汤勇、美国 SMI-TEXAS、英国 STELAX 公司等^[5,51]研究了不锈钢-碳钢复合增强体的制备方法;湖南三泰新材料股份有限公司采用将碳钢与不锈钢管套装、抽真空处理、等离子焊接等工艺,研发了新型耐腐蚀钢筋^[52]。

3.3.4 应用阻锈剂

钢筋阻锈剂是指混凝土外掺或涂刷在混凝土表面,可以直接延缓钢筋电化学腐蚀的物质。在日本、苏联和美国都有很早的研究和应用。中国东海大桥、港珠澳大桥等数百个工程中也得到了相应的应用,钢筋阻锈剂可与混凝土防腐措施相叠加保护钢筋不被锈蚀。国内外学者对钢筋阻锈剂开展了相关研究,如 Ngala 等^[53]的研究表明,应用阻锈剂的试块腐蚀速率明显较低;徐永模^[54]分析了迁移性阻锈剂对钢筋电化学反应的影响以及阻锈机理。

4 总结与展望

在收集大量实桥调查资料,以及既有相关研究的基础上,得到以下结论:

(1) 桥墩腐蚀可分为混凝土材料本身的腐蚀以及钢筋锈蚀,混凝土材料本身的腐蚀又可细分为物理腐蚀、化学腐蚀以及微生物腐蚀三个方面。本文通过收集大量资料对其腐蚀机理进行论述。

(2) 实际工程中常见的以抗氯离子渗透系数为

主要指标,采用高性能混凝土、合理增加保护层厚度、设置防腐涂层等为主要措施的防腐设计原则,可以有效的隔绝海水中易对混凝土产生腐蚀的介质的侵入,费用较低,但防腐效果有限;且一旦防腐涂层受到丝毫破坏,该涂层将不再起防护作用,所以需定期补刷,后期养护费用较大。

(3) 外加电流阴极保护技术在桥梁工程中常作为辅助防腐措施得到广泛应用,保护时长可达到 50 年以上,可以有效增加跨海大桥耐久性,但对设备管理人员的知识和经验要求非常高。在正常使用中,它可能与外部设备进行电连接或交叉绝缘,存在许多问题,且维护成本高;而牺牲阳极法的操作则较为简单,未来或可研发一种新阳极能达到 50 年以上的保护时间。

(4) 由于价格较高等原因,传统的不锈钢筋仅在中国香港地区以及国内大陆在港珠澳大桥的部分地方有所应用^[55],而在国内其它实际工程中应用较少。目前国内外学者虽然已经研发价格相对较低的不锈钢筋,但仍处于试验阶段,若将其进行产业化推广,仍有到进一步开展研究。

(5) 在混凝土拌合阶段,向混凝土添加防腐剂,施工工艺较简单,防腐效果好。与传统的混凝土防腐方法相比,防腐外加剂具有更好的防腐性能、耐久性,同时对钢筋也达到了更好的保护效果,降低了施工成本和环境限制,后期成本低,具有较好的经济效益。然而,这种混凝土防腐措施目前在国内跨海大桥桥墩的应用仍较为少见,其在实际工程中的适用性仍不得而知,因此是今后跨海大桥桥墩防腐蚀研究的重点。

参考文献:

- [1] 李承昌,叶 强. 国内外混凝土桥梁腐蚀现状[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(2):30-35.
- [2] Perme S, Lau K, Duncan M. Characterizing severe bridge pile corrosion in a marine environment[J]. Materials Performance, 2017,56(12):29-34.
- [3] 林宜光,黄 颖,朱洪明,等. 海洋环境中混凝土桥梁的腐蚀劣化与防护[J]. 山西建筑,2020,46(3):4.
- [4] 李应根,王银辉,邹毅松. 沿海环境中砼桥墩耐久性病害研究[J]. 公路与汽运,2015,171(6):181-186.
- [5] Cacace Antonino Giorgio (GB), Clark Allan Douglas (GB). Process for manufacturing corrosion resistant metal products[P]. United Kingdom: DE69421268,2000-06-15.
- [6] 杨则英. 既有钢筋混凝土桥梁安全性耐久性综合评估方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报,2014,27(5):1-96.
- [8] 陆春华,刘荣桂,崔钊玮,等. 干湿交替作用下受弯开裂钢筋混凝土梁内氯离子侵蚀特性[J]. 土木工程学报,2014,47(12):82-90.
- [9] 李永强,巴明芳,柳俊哲,等. 干湿循环作用下水泥基复合材料抗氯离子侵蚀性能及其微观结构变化[J]. 复合材料学报,2017,34(12):2856-2865.
- [10] 徐 鹏,张 研,荆 杰,等. 混凝土中氯离子侵蚀综述[J]. 混凝土,2017(9):45-48.
- [11] 汤雁冰,陈 龙,王胜年,等. 港珠澳大桥桥梁混凝土结构附加防腐蚀措施设计研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2016(4):384-390.
- [12] 侯 磊,李伟华,郑海兵,等. 海洋钢筋混凝土结构防腐蚀技术研究进展[J]. 材料保护,2017(3):68-73.
- [13] 齐 杰,金祖权,庄其昌. 沿海桥梁混凝土结构腐蚀调查及分析[J]. 工业建筑,2012(7):161-165.
- [14] 叶积镭. 温州灵昆大桥加固技术研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [15] 曾荣昌,靳 强,赖文超,等. 重庆嘉陵江石门大桥腐蚀防护调查及建议[J]. 材料保护,2009(2):72-73.
- [16] 张学峰. 跨海大桥主墩基础损伤分析及检测评价技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [17] 胡孔亮,范 超,胡大琳,等. Bond behavior between steel bar and concrete under freezing-thawing cycles and chloride erosion[J]. 科学技术与工程,2019,19(4):237-243.
- [18] 黄晋昌. 混凝土及钢筋混凝土的腐蚀与防护[J]. 铁道工程学报,2000(3):99-104.
- [19] 孙刚锋,缪彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):140-144.
- [20] 曹杰荣,金祖权,王鹏刚. 海洋环境下混凝土的硫酸盐腐蚀机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):104-109.
- [21] 李佳祺,熊建波,范志宏,等. 混凝土中钢筋的宏电池腐蚀研究进展与展望[J]. 硅酸盐学报,2021,49(8):1631-1641.
- [22] 黎鹏平,牟 龙,唐光星,等. 海洋水位变动区混凝土横向裂缝宽度对钢筋混凝土构件耐久性影响[J]. 混凝土,2020,373(11):130-133.
- [23] 秦晓川,刘加平,石 亮,等. 荷载与氯离子耦合作用下混凝土耐久性试验方法与装置的研究进展[J]. 材料导报,2020(3):106-115.
- [24] 姜文强,刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐学报,2020,48(2):258-272.
- [25] Wei J, Fu X X, Dong J H, et al. Corrosion evolution of reinforcing steel in concrete under dry/wet cyclic conditions contaminated with chloride[J]. 材料科学技术(英文版),2012,28(10):8.
- [26] Rincón O, Castro P, Moreno E I, et al. Chloride pro-

- files in two marine structures-meaning and some predictions[J]. *Building & Environment*, 2004,39(9):1065-1070.
- [27] Sun R, Wang D, Wang Y, et al. Study on durability against dry-wet cycles and chloride ion erosion of concrete revetment materials at the water-level-fluctuations zone in Yellow River Delta Wetlands[J]. *Wetlands*, 2020, 40(6):2713-2727.
- [28] Tan J, Tang C, Chen H, et al. Effect of dry-wet cycles on diffusion properties of chloride ions in unsaturated lithium slag concrete[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 40(1):72-77,8-9.
- [29] Sahmaran M, Erdem T K, Yaman I O. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting-drying and heating-cooling environments[J]. *Construction & Building Materials*, 2007,21(8):1771-1778.
- [30] 屠柳素,李遵云,秦明强. 矿物掺合料对海工混凝土长寿命化的影响[J]. *公路*,2011(5):167-170.
- [31] 赵亚丽. 聚羧酸系高性能减水剂在桥梁工程混凝土中应用对比研究[J]. *粉煤灰综合利用*,2019(4):30-32.
- [32] 迟培云,何朋祥. 高性能海工混凝土的氯离子渗透性研究[J]. *混凝土*,2011(4):17-19.
- [33] 王仁贵. 杭州湾跨海大桥总体设计[J]. *公路*,2009(5):11-18.
- [34] 杨志方. 东海大桥防腐蚀需求与现状[J]. *世界桥梁*, 2004(S1):25-27,41.
- [35] 王建. 混凝土保护层对钢筋腐蚀机理及腐蚀速率的影响[J]. *市场调查信息(综合版)*,2019(4):81.
- [36] 徐善华,牛荻涛,王庆霖. 大气环境条件下混凝土保护层取值的研究[J]. *土木工程学报*,2005,38(11):45-50.
- [37] 马建慧,徐 锋,刘伟庆,等. 保护层厚度对混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. *混凝土*,2017(5):8-11.
- [38] Tian H, Li W, Zong C, et al. Corrosion mechanism and research progress of anti-corrosion coatings for reinforced concrete used in marine environment[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2008(8):62-67.
- [39] 何晓雁,刘曙光. JS-II 型涂料对普通混凝土耐久性改善研究[J]. *水利与建筑工程学报*,2009,7(3):82-83,86.
- [40] 韩建军,王俊伟,李 果,等. 改性纳米 SiO_2 成膜复合涂层对混凝土疏水和抗碳化性能的影响[J]. *科学技术与工程*,2019,19(19):268-273.
- [41] 党 俐,陆文雄,梁晶晶. 新型混凝土防护涂层的合成及其性能研究[J]. *混凝土*,2006(10):91-93.
- [42] 王胜年,苏权科,范志宏,等. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计原则与方法[J]. *土木工程学报*,2014(6):1-8.
- [43] 崔 巩,周华新,李 磊,等. 疏水化孔栓物对混凝土性能的影响研究与应用[J]. *新型建筑材料*,2017,44(11):28-31.
- [44] 周华新,周旭东,薛永宏,等. 虎门二桥承台结构 C40 高性能混凝土耐久性提升技术[J]. *混凝土*,2018,345(7):158-161,165.
- [45] Feng Z, Wang F, Xie T, et al. Integral hydrophobic concrete without using silane[J]. *Construction and Building Materials*, 2019,227:116678.
- [46] 姜言泉,李伟祥,李 超. 海洋环境混凝土结构外加电流阴极保护技术应用[J]. *公路交通科技*, (S1):6.
- [47] 任 敏,周汝毅,张 羿,等. 外加电流阴极保护技术对海港工程钢筋混凝土结构的防护[J]. *材料保护*, 2011,44(9):58-62,93.
- [48] 陈锦虹,周明君,卢锦堂,等. 热浸镀锌钢筋在混凝土中的应用前景[J]. *材料保护*,2003,36(9):12-14.
- [49] 李延涛,庞鑫杰,刁 硕,等. 环境腐蚀对耐腐蚀钢筋混凝土梁耐久性影响[J]. *四川建筑科学研究*,2017,43(6):41-46.
- [50] 王辉绵. 港珠澳大桥用 1.4362 不锈钢钢筋生产及应用实践[C]//中国金属学会,中国太钢不锈钢股份有限公司. 2013.
- [51] 孙俊生,孙逸群,张凌峰. 一种不锈钢复合耐腐蚀钢筋及其制备方法[P]. 山东省:CN102011463B, 2012-06-20.
- [52] 向 勇,黄 玲,曾麟芳,等. 热轧不锈钢-碳钢复合钢筋的开发和应用前景[J]. *金属材料与冶金工程*, 2017,45(S1):84-88.
- [53] Ngala V T, Page C L, Page M M. Corrosion inhibitor systems for remedial treatment of reinforced concrete. Part 1: calcium nitrite[J]. *Corrosion Science*, 2002,44(9):2073-2087.
- [54] 徐永模. 迁移性阻锈剂—钢筋混凝土阻锈剂的新发展[C]//全国公路桥梁维修与加固技术研讨会, 2001.
- [55] 张兴志,朴 洵,樊翔宇,等. 不锈钢筋在跨海桥梁耐久性设计中的应用[J]. *公路交通科技*,2017(S1):28-32.