



# 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状

王胜年

(中交四航工程研究院有限公司 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230)

**摘要:** 概述了我国海港工程腐蚀环境及耐久性破坏特点, 对我国海港工程混凝土耐久性技术从20世纪80年代至今的历史、耐久性技术的研究及发展应用进行了回顾, 阐述了我国水运行业技术标准和科研成果对提高海港工程混凝土结构耐久性所发挥的作用, 最后对我国海工混凝土耐久性技术进行了展望。

**关键词:** 海港工程; 氯离子; 耐久性技术; 寿命预测模型; 耐久性设计

中图分类号: TU 528; U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0103-08

## Development and current situation for durability technology of marine concrete in China

WANG Sheng-nian

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology of the Ministry of Communications,

CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230)

**Abstract:** The corrosive environment and the characteristics of durability damage for marine concrete structures are summarized. The development process of durability technology from 1980's, the research on the durability technology and its application for marine concrete in China are described. Also, the durability technology for marine concrete is prospected.

**Key words:** marine engineering; chloride ion; durability technology; life prediction model; durability design

建国60年来, 我国港口工程建设发生了巨大的变化, 目前, 我国沿海已从解放初期仅有的6个较大港口、160多个泊位, 发展到今天已具有1400多个沿海港口、4500多个泊位。自进入21世纪后, 我国港口货物吞吐量 and 集装箱吞吐量已连续多年稳居世界第一, “十一五”末, 沿海港口货物吞吐量将增加到50亿t。作为重要的交通基础设施, 海港工程在我国国民经济发展中发挥了重要作用。

我国港口工程建设取得了今天举世瞩目的成就, 在技术上取得了辉煌成绩的同时, 在技术发展历程中也有不少值得总结的经验。如于1956年建成, 由我国自行设计施工的首座万吨级海港码头——湛江港一区老码头, 由于当时对耐久性的

认识和经验不足, 码头上部混凝土结构水灰比较大、粗骨料粒径较大且构件配筋过密、保护层厚度偏薄, 甚至还采用海砂配制混凝土。该码头使用才8年, 就发现所有的轨道梁底均发生了严重钢筋锈蚀现象, 使用24年后, 码头面板、纵横梁发生锈胀破坏的情况相当严重, 使用32年后, 混凝土梁、板等主要构件锈胀破坏率达到了90%以上, 加上码头基础处理不当位移情况严重, 码头安全已无法保障, 不得不拆除改建成钢板桩码头, 耗资数千万元<sup>[1]</sup>。与此具有相类似的情况, 大量工程调查结果表明, 我国20世纪70—80年代以前建的海港工程因材料劣化导致功能降低的情况普遍存在<sup>[2]</sup>。究其原因是海港工程所处的海水环境比一般环境恶劣的多, 但由于当时技术水平

收稿日期: 2010-09-16

作者简介: 王胜年(1963—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事建筑材料及耐久性研究。

所限,对耐久性认识不足,设计施工标准偏低,导致相当一部分海港工程达不到预定的设计使用寿命而过早损坏。

近20~30年来,交通部组织行业内相关单位针对海港工程混凝土结构耐久性问题进行科技攻关,经过广大科研、设计和施工技术人员的不懈努力,在海水环境混凝土结构耐久性基础理论、混凝土防护、高性能混凝土以及耐久性设计施工技术等方面均取得了一系列的技术突破,耐久性相关行业技术标准也达到国内领先和国际先进水平,使得我国海港工程混凝土结构耐久性寿命从只有20~30年已可以提高到50年以上。

## 1 腐蚀环境及耐久性破坏特点

### 1.1 腐蚀环境

我国有超过20 000 km的海岸线,由北到南气候条件相差很大。表1为我国典型地区海港工程自然条件。

表1 我国典型地区港口地理位置和自然条件

港口	地理位置	气温/℃			相对湿度/%	海水含盐量/%
		最高	最低	平均		
湛江	雷州半岛	37.3	4.0	23.5	85	2.20~3.00
八所	海南北黎湾	38.7	1.4	24.5	85	3.36
北仑	涌江口外	39.4	-10.0	16.3	80	2.50~2.80
连云港	海洲湾以南	38.5	-10.4	14.2	70	2.90
天津	渤海湾西部	38.9	-20.4	12.0	75	3.66

1) 广东、广西、海南等华南沿海地区属亚热带气候,各地年平均气温均在20℃以上,相对湿度大,夏季台风多;我国东南方地区气温高,阳光直射下海水的蒸发量大,空气湿度大,且夏秋季节多有台风。

2) 福建、上海、浙江、江苏等华东沿海属温带气候,相对华南地区平均气温要低10℃左右,每年受台风的影响也相对较少,但季节性的温差大。

3) 天津、辽宁、山东等北方沿海属寒冷地区地区,最冷月平均气温一般都在-4℃以下,年天然冻融循环次数均在50次以上。

我国海水的含盐量以纬度较高的渤海海区较低,黄海、东海逐渐升高,纬度较低的南海盐度

较高,但总体上海水中盐度变化量不大。由于华南地区的高温高湿环境特点,使得华南地区海水腐蚀环境尤为恶劣。

连云港为我国最北的不冻港,以连云港为界的华东及华南地区港口均为不冻港,北方地区的港口为受冻港。北方地区海港码头除具有海水环境的腐蚀特点外,还受冻融腐蚀的影响。

### 1.2 我国已建港口工程破坏特点

1) 氯盐引起的锈蚀破坏是目前我国港口工程的主要破坏形式。

我国由南到北,气候环境差异明显,但影响我国海港工程混凝土结构耐久性最主要的问题,是氯离子渗入混凝土中引发钢筋腐蚀破坏。从对我国的港口工程实施的调查情况可以看出,无论南北方,港口工程因氯盐引起的腐蚀破坏情况是非常严重和相当普遍的。20世纪80年代,天津港湾工程研究所等单位曾对我国北方地区港口工程进行过两次系统的调查<sup>[5]</sup>,调查结果表明,虽然北方地区受冻融破坏是一个较严重的问题(主要是20世纪70年代前修建的码头),但锈蚀破坏普遍存在。20世纪70年代以后,由于北方地区普遍采用了掺引气剂的抗冻措施,相对来说,冻融破坏已不是非常突出。

2) 海港工程的锈蚀破坏以浪溅区部位最严重。

华南、华东、北方地区的调查结果均表明,较严重的钢筋锈蚀破坏大都发生在设计高水位附近的浪溅区,该区域频繁遭受潮汐、海浪作用,氯离子易于积聚,处于非饱水状态的混凝土氯离子较容易向深层渗透扩散,且该区域供氧充分,锈蚀过程极易发生。受氯离子和通氧条件的影响,海港工程混凝土结构按锈蚀破坏易发生部位顺序依次为浪溅区、潮差区、大气区和水下区。

### 1.3 锈蚀破坏情况因不同环境条件而有所差异

我国华南和华东地区钢筋混凝土结构锈蚀破坏情况相类同,北方地区钢筋混凝土结构锈蚀破坏程度较东南地区轻;通常,天然港的港池布置顺其自然,往往风浪大,人工港池在设计时可避开常风向,减少风浪对结构物的直接作用;同一港区、甚至同一泊位处于不同位置的构件因不同的风浪、温

湿度影响，锈蚀情况也有差别，位于码头后方不通风区域的混凝土构件腐蚀程度高于码头前沿相对开敞区域；在所有结构形式的码头中，腐蚀破坏最严重的是桩基梁板结构物，锈蚀破坏部位主要发生在处于浪溅区的桩、桩帽、纵横梁和板上，但重力式码头基本上不会发生锈蚀破坏。

图1, 2是我国海港工程桩基梁板结构码头上部梁、板等构件钢筋锈蚀破坏的典型情况。



图1 码头横梁锈蚀破坏典型情况



图2 码头面板底部锈蚀破坏典型情况

## 2 耐久性历史及标准规范的发展

交通部曾数次组织相关单位开展全国范围内的海港码头调查工作。较早于20世纪60年代南京水利科学研究院、交通部第四、二、三航务工程局科学研究所开展针对沿海港口工程结构破坏情况的调查<sup>[4-5]</sup>，其后20世纪80~90年代及近10年来，相关科研单位陆续开展不同规模和范围的调查工作。在掌握了我国海港工程耐久性总体状况后，交通部组织相关单位，结合耐久性研究成果，及时对相关标准规范进行修订和完善。文章重点对1980年后近30年来的耐久性历史和标准规范发展进行回顾。

### 2.1 20世纪80年代情况

#### 2.1.1 耐久性情况

1981年，由交通部第四航务工程局科学研究所主持、南京水利科学研究院参加的华南沿海地区18座码头调查的结果引起了巨大的反响<sup>[6-7]</sup>。此

后，南京水利科学研究院、三航局科研所、上海交通大学及三航设计院等单位对华东地区以及天津港湾工程研究所对北方地区30余座海港码头进行了调查<sup>[8-10]</sup>。

调查结果指出，华南地区海港码头80%以上都发生了严重或较严重钢筋锈蚀破坏，出现锈蚀破坏的时间有的仅5~10年。华东和北方地区调查也得出类似结果，如连云港杂货一、二码头于1976年建成，1980年就发现有裂缝和锈蚀，1985年其上部结构已普遍出现顺筋裂缝，1980年建成的宁波北仑港10万吨级矿石码头，使用不到10年其上部结构就发现严重的锈蚀损坏；天津港客运码头1979年建成，使用不到10年，就发现前承台面板有50%左右出现锈蚀损坏。

20世纪80年代海港码头调查结果表明，我国于80年代前建成的高桩码头混凝土结构大部分仅5~10年就出现锈蚀破坏，即使加上钢筋锈蚀开裂的时间，耐久性寿命也就是20年左右。

#### 2.1.2 标准规范情况

海港工程混凝土结构耐久性之差令人震惊，究其原因除了施工质量存在一定问题外，主要是当时对氯离子侵入引发钢筋锈蚀的严重性认识不足，从当时执行的JTJ 269-1978《港口工程技术规范》<sup>[11]</sup>（以下简称78规范）可以看出：没有针对防止氯离子渗入引发的钢筋锈蚀制订有效措施，耐久性关键的技术指标规定不合理，如混凝土水灰比最大允许值偏大、保护层厚度偏小、无最少水泥用量规定以及粗骨料最大粒径规定不合理等，造成混凝土护筋性能差。

交通部高度重视此阶段调查成果，果断采取措施，组织相关单位对当时的标准进行修订，于1987年颁布实施了JTJ 228-1987《海港钢筋混凝土结构防腐蚀技术规定》和JTJ 229-1987《海港预应力混凝土结构防腐蚀技术规定》<sup>[12-13]</sup>（以下简称87规范）。表2为规范修订前后与耐久性有关的主要内容对比情况。

### 2.2 20世纪90年代情况

#### 2.2.1 耐久性情况

20世纪90年代后期，广州四航工程技术研究院（原交通部四航局科研所）、南京水利科学研

表2 20世纪80年代耐久性参数规范修订情况

耐久性参数	JTB 269—1978《港口工程技术规范》	JTJ 228—1987《海港钢筋混凝土结构防腐蚀技术规范》 JTJ 229—1987《海港预应力混凝土结构防腐蚀技术规范》
腐蚀部位划分	水上区、水位变动区、水下区	大气区、浪溅区、水位变动区、水下区
最大水灰比	受冻地区0.45, 不冻地区0.55	南方浪溅区0.45
保护层厚度	受冻区50 mm, 不冻地区40 mm	浪溅区最小保护层厚度60 mm
粗骨料最大粒径	没有根据保护层厚度所作的限制规定	根据保护层厚度、构件尺寸和配筋情况作限制规定
掺合料规定	不宜采用火山灰水泥, 不冻地区可采用矿渣水泥	南方地区可采用粉煤灰水泥

究院等对按87规范设计施工的我国东南沿海部分码头进行调查<sup>[14-17]</sup>, 从总的调查情况来看: 执行87规范后修建的码头腐蚀破坏情况明显减轻, 如赤湾港各码头、蛇口集装箱码头、北仑电厂码头虽已使用了10年左右, 基本上未出现严重破坏现象, 说明87规范对混凝土耐久性指标的修订, 对提高海港工程混凝土耐久性来说效果是显著的。根据耐久性预测推算, 按87规范设计施工的海港码头使用寿命可达30年<sup>[18]</sup>。

虽然87规范对提高港口工程混凝土结构的耐久性起到了重要作用, 但如果设计和施工质量控制得不好, 港口工程仍可能在较短的使用年限

内发生破坏, 如1992年建成的某油气码头, 结构设计的保护厚度层混凝土施工配合比均不满足规范的规定, 且混凝土施工质量差, 缺陷多, 使得该码头在使用了短短的8年后即出现严重破坏情况, 已严重危及码头使用的安全性, 不得已于2001年实施全面大修。

### 2.2.2 标准规范情况

为进一步提高海港工程混凝土结构耐久性, 交通部再次组织对规范的修订, 于1996年颁布实施JTJ 269—1996《水运工程混凝土质量控制标准》<sup>[19]</sup>、JTJ 268—1996《水运工程混凝土施工规范》<sup>[20]</sup>, 修订前后内容对比情况见表3。

表3 20世纪90年代耐久性参数规范修订情况

耐久性参数	JTJ 228—1987《海港钢筋混凝土结构防腐蚀技术规范》 JTJ 229—1987《海港预应力混凝土结构防腐蚀技术规范》	JTJ 269—1996《水运工程混凝土质量控制标准》 JTJ 268—1996《水运工程混凝土施工规范》
腐蚀部位划分	大气区、浪溅区、水位变动区、水下区	相同四个区规定, 增加港口有掩护和无掩护规定
最大水灰比	浪溅区0.45	浪溅区0.40
保护层厚度	浪溅区最小保护层厚度60 mm	浪溅区保护层厚度65 mm
掺合料规定	南方地区可采用粉煤灰水泥	允许外掺粉煤灰、矿渣粉、硅粉等
结构构造	无规定	作了有利于耐久性的规定

1996年规范将浪溅区混凝土保护层最小厚度规定为65 mm、最大水灰比不得大于0.40、混凝土拌合物允许外掺粉煤灰、矿渣粉、硅灰等掺合料三项重大修改和补充, 尤其是在系统研究基础上, 国内率先允许外掺活性矿物掺合料配制混凝土, 奠定了活性掺合料作为提高混凝土抗氯离子渗透性能措施的技术基础, 各项耐久性控制指标与国外相比达到国际先进水平<sup>[21]</sup>。

至20世纪90年代末, 我国交通行业相关科研单位长期不懈的研究形成了大量的科研成果, 出现了大批耐久性新技术和新材料。为推广应用新技术、新材料, 在总结成果的基础上, 2000年交通部又制订颁发了JTJ 275—2000《海港工程混

土结构防腐蚀技术规范》<sup>[22]</sup>, 见表4。

表4 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》重要内容

1	明确规定了耐久性质量控制指标: 南方浪溅区混凝土不大于2 000 C, 高性能混凝土不大于10 000 C
2	将海工高性能混凝土列为提高海港工程混凝土结构耐久性的首选措施
3	允许外掺大掺量的矿物活性掺合料以配制具有优异抗氯离子渗透性的海工高性能混凝土
4	规定对海港工程重要部位采取涂层、环氧涂层钢筋、硅烷浸渍等防腐蚀措施的设计施工规定

该规范首次规定了耐久性质量控制指标, 解决了长期以来混凝土耐久性质量控制无据可依的问题; 确定了大掺量掺合料配制高性能混凝土的技术途径, 并将高性能混凝土作为提高海港工程

混凝土结构耐久性的首选措施；国内率先系统对海工混凝土结构进行了附加防腐措施的规定。

### 2.3 2000年后情况

#### 2.3.1 耐久性情况

2006~2008年，作为交通部“十一五”重大专项课题的一项重要内容，由中交四航工程研究院有限公司、南京水利科学研究院、中交天津港湾工程研究院有限公司、中交上海三航科学研究所有限公司组成的课题组又一次开展全国范围内的调查工作。区别于以往的调查，本次调查统一调查方法，调查范围覆盖了我国典型环境地区；除外观普查外，还进行了氯离子分布、钢筋锈蚀等专项检测，调查内容更系统全面；调查了北方、华东及南方共31座码头，规模大，数据样本多。

本次调查的重点是1996年前后建成的海港码头。1987~1996年期间建成、使用时间为13~17年的码头，多数构件表面出现锈蚀痕迹，说明混凝土中的钢筋已经发生锈蚀，部分出现了较为严重的锈蚀开裂现象。1996年以后建成的码头有的使用时间已超过10年，但从对使用了10年左右的码头调查情况来看，基本未出现钢筋锈蚀情况。

由于经历了数次修订，耐久性相关标准规定日渐完善，高性能混凝土和防腐措施被广泛应用，加上设计施工技术水平的不断提高，2000年后执行按现行标准建成的我国海港工程混凝土结构，虽然由于使用时间较短，暂时还未获的充足的耐久性调查数据，但根据所获得的数据进行推断，耐久性使用寿命可以达到50年以上<sup>[23]</sup>。

#### 2.3.2 标准规范情况

2000年后，交通部又组织对《水运工程混凝土质量控制标准》进行修订，并针对海工高性能混凝土被作为提高耐久性重要措施而被广泛使用的情况，组织制定《海港工程高性能混凝土质量控制标准》。目前，这两本标准均已完成送审稿，即将报批颁布。为了克服传统仅靠经验的设计方法不足问题、保证目标设计使用寿命、提高耐久性设计的技术可靠性，交通部在新的水运工程标准体系表中增加了《水运工程耐久性设计标准》，目前此项标准的制定工作已全面启动。

此外，提高我国港口码头的维护、维修技术水平，保证已建港口水工建筑物的安全性、使用性和尽量延长码头结构的安全使用寿命，交通部已于2006年制定颁布了《港口水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[24]</sup>，除修订《港口设施维护技术规范》外，还组织制定《港口水工建筑物修补加固技术规范》，目前此规范已完成总校，即将颁布实施。

经过数十年的技术发展和工程经验积累，我国港口工程已逐步形成从设计施工到维护保养的成套技术标准体系，标准的技术进步和新技术、新材料的广泛应用，对我国海港工程混凝土结构实现50年以上甚至达到100年的使用寿命将发挥重要的技术保障作用。

## 3 耐久性研究及技术发展

耐久性是一项需要长期坚持的基础性研究工作。30多年来，广大科研工作者通过不懈的努力，在海港工程混凝土结构耐久性方面取得了丰硕的研究成果。多项新技术、新材料被广泛采用，对提高海港工程耐久性发挥了积极的技术支持作用，多项成果被纳入行业标准规范，对标准规范的制定和多次修订提供了重要的理论依据，推动了行业耐久性技术发展。

### 3.1 海港工程长期暴露试验和工程调查研究

20世纪80年代海港码头的调查情况引起了交通部高度重视，为了加强海港工程混凝土结构耐久性基础研究工作，除数次组织开展码头工程调查外，交通部于拨专款在广东湛江、海南八所、江苏连云港以及天津港等海港修建了暴露试验站，旨在对我国典型海水环境混凝土结构耐久性影响因素及耐久性损伤破坏规律进行系统研究。其中最典型的如湛江暴露试验站共设置有大气区、浪溅区、潮差区和水下区等不同典型腐蚀环境，放置有各种参数的混凝土试件数千件，至今已积累了长达20多年的暴露试验数据。暴露试验结果真实地反映了粗骨料最大粒径、水灰比、保护层厚度、活性矿物掺合料等参数对耐久性的影响，并通过不同龄期的取样分析和研究，可靠地揭示了氯离子在混凝土内的渗透扩散的影响因素

和耐久性的退化规律。暴露试验和工程调查研究成果为标准规范的制定和数次修订提供了重要的技术依据,为海洋环境混凝土结构耐久性失效理论研究和建立耐久性寿命计算模型奠定了可靠地理论基础<sup>[23]</sup>。

### 3.2 海工高性能混凝土技术

为了提高海港工程混凝土的护筋性能,20世纪90年代中期交通部四航局科研所即开展了大掺量粉煤灰高性能混凝土的研究<sup>[25]</sup>,其后,四航局科研所等原中国港湾工程建设(集团)各科研院所联合开展“抗盐污染高性能混凝土配制成套技术研究”<sup>[26]</sup>,研究成果突破了传统使用活性掺和合料掺量的规定,配制的高性能混凝土抗氯离子渗透性和使用寿命可成倍增长,解决了普通海工混凝土耐久性差的技术难题。高性能混凝土技术被纳入《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》并作为提高海港工程混凝土结构耐久性首选措施后,不仅被国内外多项大型重点海港工程广泛采用,而且成果入编国家“十五”期间《建筑业10项新技术》,目前已成为我国港口工程、跨海通道工程、沿海公路桥梁及铁路工程等交通土木工程领域普遍采用的新技术。

### 3.3 海港工程混凝土结构的腐蚀与防护技术

为了阻止或减少海水中氯离子对混凝土结构的侵蚀作用,我国相关单位从20世纪80年代开始围绕着提高海洋环境混凝土结构耐久性开展了系统的防护技术研究,开发了适合于海上浪溅区和大气区的憎水型硅烷浸渍防护技术、适合于潮汐浪溅区可在潮湿表面施涂固化的隔离型涂层防护技术、可阻止渗入的氯离子对钢筋侵蚀作用发生的钢筋阻锈剂和环氧涂层钢筋技术等,并成功应用于国内外多项大型海港工程和跨海大桥工程。2000年后,引进开发了既可用于新建工程、也可用于已建工程的混凝土结构外加电流阴极保护技术,保护年限可达50年以上,并成功应用于目前世界最长跨海大桥——杭州湾大桥主塔防腐蚀工程。在研究和总结工程应用经验的基础上,制定了我国首部《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》,形成了我国海港工程混凝土结构耐久性防护技术体系。

### 3.4 海港工程混凝土结构寿命预测及耐久性设计技术

由于海港工程混凝土耐久性失效过程极为复杂,耐久性失效理论、寿命预测模型及相关耐久性设计方法成为近些年国内外耐久性研究的热点<sup>[27-33]</sup>。

目前,标准规范一些耐久性关键技术参数还暂时停留在理论和凭经验判断的技术水平上,与耐久性直接相关的新建工程使用寿命仍无法准确预知。传统的混凝土耐久性设计还是遵循简单的“假定符合”方法,不能够明确给出性能和设计使用年限之间的关系。

由中交四航工程研究院有限公司等十家单位共同承担的交通部“十一五”重大科技专项“离岸深水港关键技术与研究”项目之“海港工程混凝土结构耐久性寿命预测及健康诊断研究”课题,以海港工程长期暴露试验和实体工程调查成果对耐久性劣化模型参数进行修正,首次建立了与我国典型海工混凝土结构相吻合的寿命预测模型。采用对数年前暴露试验“室内复原”的方法,建立了海工混凝土耐久性质量控制指标与设计使用年限之间定量关系,实现了海工混凝土结构耐久性设计的重大技术突破,并开发实时监测的健康诊断预警技术和相关软件,为已建工程的耐久性实时监控和耐久性失效预警、耐久性再设计奠定了技术基础。

### 3.5 海港工程混凝土结构耐久性检测评估与维修技术

随着时间的延长,我国20世纪70~80年代建成的海港码头材料劣化、功能降低的情况日趋严重。传统的耐久性检测评估工作只能实行对混凝土内氯离子渗透情况检测及构件破损情况、钢筋锈蚀情况的外观描述。通过多年来的研究,已基本掌握了混凝土结构耐久性退化规律和耐久性极限状态失效点的关键技术参数取值,不仅可以科学评估现有结构的耐久性现状,而且可以较准确地预测结构物的剩余使用寿命,实现了海洋环境混凝土结构耐久性由定性的外观劣化度评估到定量的剩余使用寿命评估。针对海洋环境混凝土结构氯离子已渗入,即使修复又会短期内发生再次

腐蚀的特点，开发出可排除混凝土中氯离子的电化学反应脱盐和抑制混凝土中氯离子引发钢筋腐蚀的外加电流阴极保护技术，可有效地解决海工混凝土结构传统维修方法效果差、重复修的技术难题。在系统研究的基础上，针对海洋环境基础设施的环境和耐久性腐蚀破坏特点，制定了我国《港口水工建筑物检测评估技术规范》和《港口水工建筑物加固技术规范》，初步形成了我国海工基础设施混凝土结构健康诊断预警和维修维护成套技术体系。

#### 4 结语

从对耐久性认识和经验不足到形成具有系统理论基础的耐久性技术标准，从单一的普通混凝土材料发展到高性能混凝土外加防腐蚀措施的综合防护技术体系，从单纯满足规范仅凭经验的“假定符合”发展到与设计使用年限具有相关关系的耐久性设计，从外观劣化情况检测评估及简单维修发展到可进行剩余使用寿命预测和综合电化学技术的长效修复技术，我国海港工程混凝土结构已经形成新建工程耐久性设计施工、已建工程耐久性检测评估和耐久性维修成套技术体系。耐久性技术的不断发展，使我国海港工程混凝土结构耐久性寿命从20世纪80年代以前的不到20年，发展到现在可以达到50年以上甚至100年。30年来的技术跨越发展，使我国海港工程混凝土结构耐久性综合技术已达到了国际先进水平。

混凝土耐久性影响因素复杂，需要的研究周期长，成果的取得需要系统的研究，更需要长期研究工作的积累。我国在海港工程耐久性技术上取得了较大的进步，同时也为今后进一步研究打下了基础。目前至未来，我国大型离岸深水港、跨海湾通道和沿海道路桥梁等海洋环境交通基础设施建设任务仍很繁重，工程使用寿命和全寿命总成本已成为工程建设和营运管理必须要高度重视的一个重要问题，而与之有直接关系的耐久性问题如：能反映工程结构实际状态的荷载和环境耦合作用下的耐久性问题、能建立工程寿命与结构和材料早期性能之间定量关系且具有保证率的耐久性可靠度设计方法、具有自抗蚀或高抗蚀功

能且长效环保的防腐蚀新技术和新材料、环境影响的耐久性实时监控、剩余寿命预测和功能退化预警及耐久性快速恢复和功能永久保持技术将是未来耐久性研究的重要方向，相信通过各界的重视和广大耐久性科研工作人员的不断努力，我国海港工程混凝土结构耐久性总体技术必将会达到世界领先行列。

#### 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] 广州四航工程技术研究院.港口工程结构设计使用年限调查专题研究报告[R]，2004.
- [3] 天津港湾工程研究所.北方地区重力式海工混凝土建筑物耐用年限的调查研究[R]，1988.
- [4] 吴绍章,林宝玉.我国沿海港口建筑物混凝土耐久性调查报告[R].南京：南京水利科学研究所，1964.
- [5] 南京水利科学研究所,交通部第四、二、三航务工程局.我国南方港工、水工混凝土和钢筋混凝土耐久性调查报告[R]，1968.
- [6] 交通部四航局研究所,南京水利科学研究所.华南海港钢筋混凝土码头锈蚀破坏调查报告[R]，1981.
- [7] 潘德强,洪定海,邓恩惠,等.华南海港钢筋混凝土码头锈蚀破坏调查报告[R].广州：中交四航工程研究院有限公司,1982.
- [8] 南京水利科学研究所,连云港港务局.连云港桩基一、二码头上不钢筋混凝土结构破坏情况调查和破坏原因分析报告[R]，1986.
- [9] 上海交通大学,交通部三航局研究所.华东海港告状码头钢筋腐蚀损坏情况调查与结构耐久性分析[R]，1988.
- [10] 交通部一航局研究所.北方地区重力式海工混凝土建筑物耐用年限的调查研究[R]，1988.
- [11] JTJ 269-1978 港口工程技术规范[S].
- [12] JTJ 228-1987 海港钢筋混凝土结构防腐蚀技术规定[S].
- [13] JTJ 229-1987 海港预应力混凝土结构防腐蚀技术规定[S].
- [14] 交通部第四航务工程局科学研究所.赤湾港码头调查报告[R],1998.
- [15] 四航研究所.湛江港一区南一期工程高桩码头防腐工程可行性研究报告[R],1998.
- [16] 广州四航工程技术研究院.惠州港油气码头裂缝调查论

证[R],2000.

[17] 南京水科院,宁波港务局.北仑港码头钢筋混凝土构件腐蚀破坏调查与分析[R],1996.

[18] 王胜年.华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J].水运工程,2000(6):8-12.

[19] JTJ 269-1996 水运工程混凝土质量控制标准[S].

[20] JTJ 268-1996 水运工程混凝土施工规范[S].

[21] 潘德强,我国海港工程混凝土结构耐久性现状及对策[C],北京:土建结构工程的安全性及耐久性,2001.

[22] JTJ 275-2000 海港工程混凝土结构防腐技术规程[S].

[23] 中交四航工程研究院有限公司.海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究报告[R],2009.

[24] JTJ 302-2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].

[25] 王胜年.提高海港工程混凝土的耐久性——大掺量粉煤灰高性能混凝土的研究[C].苏州:第四届全国混凝土耐久性学术交流会,1996.

[26] 广州四航工程技术研究院.抗盐污染高性能混凝土配制成套技术研究[R],2002.

[27] 田俊峰,潘德强,赵尚传.海工高性能混凝土抗氯离子侵蚀耐久性寿命预测[J].中国港湾建设,2002(2):1-6.

[28] 赵尚传.钢筋混凝土结构基于可靠度的耐久性评估与试验研究[D].大连:大连理工大学,2001.

[29] 王胜年,海港工程混凝土耐久性设计与寿命预测[C].沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛与全国第六届混凝土耐久性学术交流会,2004.

[30] 关宇刚,孙伟,缪昌文.基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型Ⅱ:模型验证与应用[J].硅酸盐学报,2001,29(6):535-540.

[31] Version 1.0.0.Life-365 Computer Program for Predicting the Service Life and life Cycle Coste of RC Exposed to Chlorides[R],2000.

[32] Duracrete, Final Technical Report, The European Union-Brite Euram III, Contract BRPR-CT95-0132, Document BE95-1347/R17[R], 2000.

[33] Fib Model Code for Service Life Design, fib Bulletin 34[R], 2006.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

### 评委点评:

30多年来,我国在海港工程混凝土结构耐久性方面取得了丰硕的研究成果,为规范的制定和修订提供了重要的理论依据。将这些成果融入一篇文章,使得同仁能够一览这一艰辛历程并掌握其概要,是一项非常有意义的工作。

混凝土耐久性影响因素复杂,人类的认识永无止境。可贵的是,该文没有止步于对已取得成果的总结,而是提出了下一步的研究方向,如工程结构实际荷载和环境的耦合作用、工程寿命与材料性能之间的定量关系、具有长效环保的防腐蚀新技术和新材料等等,因而提升了论文的技术内涵。

这一领域的研究在世界发达国家已开展多年,成果颇丰,如果在文章背景中能有一定的展现和对比,则更能锦上添花,也便于我国学习、借鉴世界领先水平。



2012年12月

### 评委简介:

王诺,工学博士,教授,大连海事大学航运发展研究院副院长,博士生导师。

先后出版《世界老港城市化改造发展研究》、《建设项目经济评价案例教程》、《工程物流学导论》、《网络计划拓展研究》、《邮轮经济》、《系统思维的轮回》等学术专著6部,发表学术论文40余篇,主持国家和省部级科研课题5项,完成工程项目论证和港工设计80余项。