



某海港码头结构耐久性调查与分析

王成启, 谷坤鹏

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 对华东地区建于90年代服役11年的某海港码头的构件力学性能、耐久性等进行了现场调查与分析。调查结果表明: 构件混凝土的力学性能和保护层厚度基本满足设计要求, 但构件混凝土电阻率较低, 存在氯盐腐蚀的可能性, 构件的表面已出现了锈斑, 产生了氯盐腐蚀现象; 构件的游离氯离子浓度与总氯离子浓度存在相关性, 游离氯离子浓度计算的扩散系数小于总氯离子计算的扩散系数; 随着高程的增加, 构件的表面氯离子浓度具有降低的趋势; 构件混凝土抗氯盐侵蚀性能存在一定的差别。调研结果可为进一步制定有关海港工程混凝土耐久性标准提供参考。

关键词: 海港码头; 结构耐久性; 调查; 表面氯离子浓度; 扩散系数

中图分类号: U 658.91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0114-05

Investigation and analysis on concrete structure durability of a seaport wharf

WANG Cheng-qi, GU Kun-peng

(China Communications Shanghai Third Harbor Engineering Science Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The mechanical properties and durability of marine wharf concrete members constructed in 1997 in the east of China after 11 years' service was widely surveyed and researched. The results show as follows: Compressive strength of members and concrete cover of members can meet the design demand but member's resistivity is small; There is correlation between free chloride concentration and total chloride ions concentration and free chloride's diffusion coefficient is smaller than total chloride ions; Surface chloride ions concentration reduces as elevation increases; The quality and corrosion resistance to chloride salt of members is different. The surveying results may make for establishing marine concrete standard.

Key words: seaport wharf; structure durability, investigation and analysis; chloride concentration; diffusion coefficient

大量现场调查表明^[1-3], 在海洋环境中由于氯离子的侵蚀而导致混凝土腐蚀破坏施工海工建筑物最普遍和最严重的损失形式, 严重影响了建筑物的安全, 引起工程界高度重视。为此, 交通运输部组织分别制定了JTJ 228—1987《海港钢筋混凝土结构防腐蚀技术规定》^[4]和JTJ 229—1987《海港预应力混凝土结构防腐蚀技术规定》^[5], 这些规范的制定对提高海港码头混凝土结构耐久性起到了重要作用。20世纪90年代后期, 广州四航工程技术研究院等科研单位又针对按JTJ 229—1987

规范前后修建的码头开展调查, 调查结果表明, 按JTJ 229—1987规范设计施工的海港混凝土结构, 钢筋腐蚀破坏的情况明显减轻^[6-7]。这表明JTJ 229—1987对混凝土耐久性指标的修订和对提高港口混凝土耐久性来说效果十分显著。

为进一步提高海港工程混凝土结构的耐久性, 1996年交通运输部组织制定并颁布了JTJ 269—1996《水运工程混凝土质量控制标准》、JTJ 267—1998《港口工程混凝土结构设计规范》和JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防

收稿日期: 2013-06-10

作者简介: 王成启(1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事港口工程材料研究与技术服务工作。

腐蚀技术规范》。由于1996年新规范实施后兴建的海港码头工程使用年限较短, 华东地区的海港码头混凝土结构尚无调查统计分析资料。本文对建于90年代的已运行11年某华东海港码头的腐蚀状况进行调研, 以进一步明确海港混凝土结构腐蚀的特点, 调研的主要内容包括力学性能、保护层厚度和碳化深度以及海水侵蚀状况进行检测与分析, 重点对码头构件混凝土氯盐腐蚀特点进行分析。

1 工程概况

码头位于浙江省舟山市嵊山岛。工程设计为1万吨级油码头, 于1997年建成投产。码头全长约175 m, 其中南侧约60 m与2#码头共用, 由一座长123.7 m、宽5.4 m的引桥与驳岸连接。码头由1个工作平台、1个系缆墩、1个人行桥墩组成(与2#码头共用一段不计), 其间采用人行桥连接; 工作平台长120 m, 宽15 m, 由2个分段18榀排架组成, 北分段长53 m、8榀排架, 南分段长67 m、10榀排架; 引桥由8榀排架组成。码头平台为高桩梁板结构形式, 排架间距7 m, 上部结构采用正交梁板, 基桩采用600 mm×600 mm预应力混凝土方桩; 系缆墩、人行桥墩为高桩墩台结构形式, 基桩采用600 mm×600 mm预应力混凝土方桩; 引桥为高桩横梁(墩台)与正交空心板结构形式, 海侧4个排架引桥墩基桩采用600 mm×600 mm预应力混凝土方桩, 岸侧4个排架引桥横梁基桩采用 ϕ 800 mm钻孔灌注桩。方桩的设计强度等级为C40, 保护层厚度为50 mm; 灌注桩的设计强度等级为C25, 保护层厚度为50 mm; 工作平台横梁的设计强度等级为C30, 保护层厚度为50 mm; 靠船构件的设计强度等级为C30, 保护层厚度为70 mm; 剪刀撑的设计强度等级为C30; 空心板设计强度等级为C50, 保护层厚度为60 mm。

为了提高码头的使用寿命, 抵御海水环境对码头结构的侵蚀, 业主于2007年委托防腐蚀施工单位对码头结构进行了防腐蚀涂装处理。防腐蚀涂装按表干区和浪溅区根据不同的施工工艺进行施工, 表干区和浪溅区设计防腐蚀涂层干膜厚度分别为290 μ m和340 μ m。

2 调查结果与分析

2.1 力学性能、保护层厚度和碳化深度

2.1.1 力学性能

采用回弹法结合取芯进行混凝土构件抗压强度检测, 检测结果见表1。检测结果表明各类构件实测强度均达到原设计强度等级, 但剪刀撑实测强度相对富余量较小。

表1 码头构件混凝土强度检测结果

构件名称	设计强度等级	强度/MPa		
		平均值	最小值	标准差
方桩	C40	45.4	42.1	2.01
灌注桩	C25	32.8	31.4	1.85
工作平台横梁	C30	38.4	37.1	1.06
工作平台面板	C30	39.7	36.1	0.85
引桥横梁	C30	35.6	33.2	1.29
引桥空心板	C50	53.5	51.6	1.21
靠船构件	C30	38.6	37.1	2.01
系缆墩	C30	40.7	40.3	1.58
剪刀撑	C30	32.9	30.6	1.09

2.1.2 保护层厚度和碳化深度

对各类构件抽取2%且不少于5个构件进行保护层厚度检测, 对各类构件抽取2%且不少于3个构件进行碳化深度检测, 检测结果见表2。检测结果显示墩台(侧面)保护层厚度偏大, 部分灌注桩存在钢筋笼略微偏心情况, 其余构件保护层厚度基本满足设计要求; 各构件的碳化深度不大, 均不超过1 mm, 远小于混凝土保护层厚度。

表2 混凝土保护层厚度和碳化深度检测结果

构件名称	保护层厚度/mm			碳化深度/mm	
	测试结果	平均值	设计值	测试结果	平均值
方桩	52~59	55	50	0.5~1.0	1.0
灌注桩	44~59	53	50	0.5~1.0	1.0
工作平台横梁	49~59	54	50	0.5~1.0	1.0
工作平台面板	51~59	54	50	0.5~1.0	1.0
引桥横梁	50~59	54	50	0.5~1.0	1.0
引桥空心板	60~69	64	60	0.5~1.0	1.0
靠船构件	70~80	75	70	0.5~1.0	1.0
系缆墩	72~80	77	70	0.5~1.0	1.0
剪刀撑	45~59	52	50	0.5~1.0	1.0

2.2 氯盐侵蚀

2.2.1 电阻率

有关规范对混凝土电阻率与钢筋锈蚀状态判

别作出了规定^[8]，如表3所示。构件的现场电阻率测试结果如表4所示。从表4可以看出，各构件的电阻率存在很大差别，构件的电阻率在9~62 kΩ·cm，一旦发生腐蚀将具有中到高的锈蚀速率。对构件的外观调查表明，部分构件的表面已出现了锈斑，产生了氯盐腐蚀现象，如图1所示。

表3 混凝土电阻率与钢筋锈蚀状态判别

混凝土电阻率/(kΩ·cm)	钢筋锈蚀状态
>100	钢筋不会锈蚀
50~100	低锈蚀速率
10~50	钢筋活化时，可出现中高锈蚀速率
<10	电阻率不是锈蚀的控制因素

表4 构件电阻率测试结果

构件名称	测试结果/(kΩ·cm)	平均值/(kΩ·cm)
方桩	43~54	45
灌注桩	30~33	31
工作平台横梁	30~62	47
工作平台面板	39~47	44
引桥横梁	27~32	30
引桥空心板	32~34	33
靠船构件	40~52	45
系缆墩	30~39	35
剪刀撑	9~51	30



a)



b)

图1 横梁的腐蚀情况

2.2.2 混凝土氯离子渗透情况

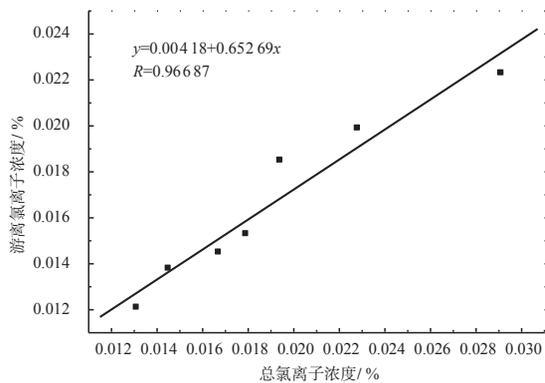
2.2.2.1 游离氯离子浓度和总氯离子浓度

从码头构件混凝土分层取粉样，测试码头代表性区域水溶性氯离子含量（游离氯离子含量）和酸溶性氯离子含量（总氯离子浓度），测定结果如表5所示。将表5中的大气区、水变

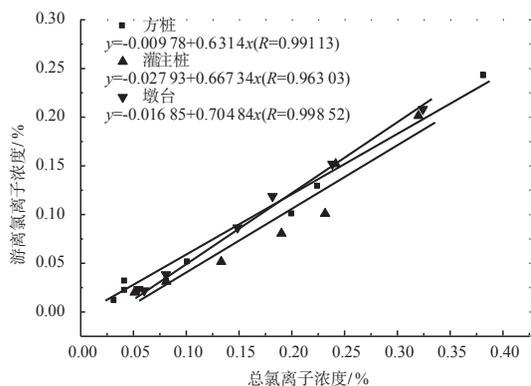
表5 氯离子含量的测试结果

构件名称	不同深度的氯离子含量/%							备注
	0~1 cm	1~2 cm	2~3 cm	3~4 cm	4~5 cm	5~6 cm	6~7 cm	
方桩（水变区）	0.242 5	0.128 8	0.100 5	0.051 2	0.031 5	0.021 9	0.011 8	水溶
	0.382 1	0.224 7	0.200 2	0.101 3	0.081 5	0.041 9	0.031 8	酸溶
方桩（浪溅区）	0.149 8	0.109 9	0.070 1	0.039 9	0.019 8	0.015 5	0.013 5	水溶
	0.209 6	0.149 2	0.086 1	0.058 4	0.024 7	0.021 2	0.020 5	酸溶
灌注桩（水变区）	0.201 4	0.151 9	0.100 9	0.080 5	0.051 6	0.031 2	0.020 1	水溶
	0.319 9	0.241 5	0.231 5	0.190 2	0.133 1	0.081 1	0.051 1	酸溶
灌注桩（浪溅区）	0.171 8	0.119 5	0.098 8	0.088 1	0.075 1	0.030 1	0.029 1	水溶
	0.219 0	0.152 7	0.155 0	0.132 2	0.095 2	0.044 1	0.038 9	酸溶
引桥横梁（浪溅区）	0.215 1	0.188 9	0.156 8	0.098 1	0.049 9	0.031 1	0.021 1	水溶
	0.363 0	0.286 2	0.206 5	0.143 1	0.092 4	0.071 1	0.049 1	酸溶
墩台（水变区）	0.208 2	0.151 9	0.118 8	0.086 6	0.038 5	0.021 9	0.023 3	水溶
	0.324 1	0.238 4	0.181 7	0.148 6	0.080 7	0.060 2	0.054 7	酸溶
墩台（浪溅区）	0.100 9	0.068 7	0.042 3	0.031 5	0.020 1	0.019 9	0.018 1	水溶
	0.149 1	0.091 7	0.072 8	0.046 6	0.030 9	0.022 6	0.021 5	酸溶
面板（大气区）	0.022 3	0.019 9	0.018 5	0.015 3	0.014 5	0.013 8	0.012 1	水溶
	0.029 1	0.022 8	0.019 4	0.017 9	0.016 7	0.014 5	0.013 1	酸溶

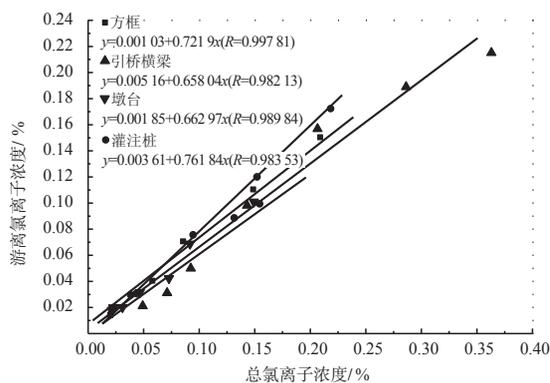
区和浪溅区的游离氯离子含量和总氯离子含量进行相关分析, 分别如图2所示, 将大气区、水变区和浪溅区的游离氯离子和总氯离子浓度的相关关系式汇总到表6。从表6可以看出, 不同区域游离氯离子含量和总氯离子含量之间具有较好的线性关系, 游离氯离子含量占总氯离子含量的60%~80%。



a) 大气区



b) 水变区



c) 浪溅区

图2 总离子含量与游离氯离子含量关系

表6 不同区域构件的相关关系式

构件名称	构件区域	相关关系式	相关系数
面板	大气区	$y=0.00418+0.65269x$	0.96687
方桩	水变区	$y=-0.00978+0.66734x$	0.99113
灌注桩	水变区	$y=-0.02793+0.66734x$	0.96303
墩台	水变区	$y=-0.01685+0.70484x$	0.99852
方桩	浪溅区	$y=0.00103+0.7219x$	0.99781
引桥横梁	浪溅区	$y=-0.00516+0.65804x$	0.98213
墩台	浪溅区	$y=0.00185+0.66297x$	0.98984
灌注桩	浪溅区	$y=-0.00361+0.76184x$	0.98353

2.2.2.2 表面氯离子浓度

构件实测的表面总氯离子浓度和拟合外推计算的表面总氯离子浓度如表7所示。从表7可以看出, 构件的表面氯离子浓度基本按水变区、浪溅区和大气区的次序递减, 大气区表面氯离子浓度最低, 这表明码头构件所处的高程对构件的表面氯离子浓度具有一定的影响。因此, 随着高程的增加, 构件的表面氯离子浓度具有降低的趋势。此外, 计算的构件表面氯离子浓度大于构件实测的表面氯离子浓度。

表7 不同构件的表面氯离子浓度

构件名称	构件区域	实测表面氯离子浓度/%	计算的表面氯离子浓度/%
方桩	水变区	0.3821	0.4252
方桩	浪溅区	0.2096	0.2381
灌注桩	水变区	0.3199	0.3671
灌注桩	浪溅区	0.2190	0.2656
引桥横梁	浪溅区	0.3630	0.4035
墩台	水变区	0.3241	0.3739
墩台	浪溅区	0.1491	0.1588
面板	大气区	0.0291	0.0309

2.2.2.3 氯离子扩散系数

分别对不同构件混凝土进行取样, 测试构件混凝土的扩散系数。根据表4中测试的数据, 可计算出构件的总氯离子含量和游离氯离子含量的扩散系数, 测试结果如表8所示。从表8的计算结果可以看出, 游离氯离子计算的构件的扩散系数小于总氯离子浓度计算的扩散系数; 而总氯离子浓度计算扩散系数在 $1.60 \times 10^{-12} \sim 8.43 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 构件的扩散系数存在一定差别, 面板、灌注桩和墩台的扩散系数较大, 这表明构件的质量存在一定差异。

表8 不同构件的扩散系数

构件名称	构件区域	总氯离子浓度 计算扩散系数/ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	游离氯离子浓度 计算的扩散系数/ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
方桩	水变区	1.84	1.46
方桩	浪溅区	1.60	1.12
灌注桩	水变区	3.00	1.95
灌注桩	浪溅区	2.95	1.17
引桥横梁	浪溅区	2.29	1.89
墩台	水变区	2.46	1.54
墩台	浪溅区	2.08	1.31
面板	大气区	8.43	5.79

3 结论

1) 各构件混凝土实测强度均达到设计强度等级。除灌注桩局部部位的保护层不合格外,混凝土保护层厚度基本满足规范要求。各构件碳化深度均不大于1.0 mm,远小于钢筋的保护层厚度。碳化对构件的混凝土结构耐久性影响不大。

2) 混凝土电阻率和氯离子扩散系数的测试结果表明,构件局部钢筋表面的氯离子浓度超过临界浓度,已遭受了氯离子侵蚀,钢筋已开始锈蚀,存在锈斑以及锈胀裂缝。

3) 不同侵蚀部位构件游离氯离子浓度与总氯离子浓度存在一定的关系,游离氯离子浓度占总氯离子浓度60%~80%;一般情况下,随着高

程的增加,构件表面的氯离子浓度具有降低的趋势。由游离氯离子浓度计算的构件扩散系数小于总氯离子浓度计算的扩散系数,构件的扩散系数存在一定差别,面板、灌注桩和墩台的扩散系数较大,这表明构件的质量存在一定差异。

4) 调研结果检验海港工程混凝土防氯盐侵蚀的有效性,有利于进一步制定有关海港工程混凝土耐久性标准,控制混凝土质量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 单国良,葛保中,李森林.镇海电厂煤码头钢筋混凝土结构破坏调查[J].水运工程,2003(3):17-19.
- [3] 王胜年,黄君哲,张举连.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.
- [4] JTJ 228—1987 海港钢筋混凝土结构防腐技术规定[S].
- [5] JTJ 229—1987 海港预应力混凝土结构防腐技术规定[S].
- [6] 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].广州:广州四航工程技术研究院,2000.
- [7] 南京水利科学研究所,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].南京:南京水利科学研究所,1996.
- [8] GB/T 50344—2004 建筑结构检测技术标准[S].

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第113页)

5 结语

经过轨道板结构实施后近两年来的现场观测证明,装卸船机及轨道板基础结构运行使用正常,码头实际沉降量低于设计沉降值,改造后码头的实际使用情况符合设计要求。

钢筋混凝土筏型轨道板结构在本项目上的应用,避免了传统轨道基础结构形式对现有码头可能产生的破坏,同时缩短了改造工程的施工周期,节省了工程成本。能够对其他类似改造工程起到借鉴意义。

参考文献:

- [1] Athena SA. Port of Fujairah South Breakwater Berths - Design Report[R]. Athena SA, 2008.
- [2] 中国港湾工程有限责任公司.阿联酋富吉拉港装卸船机基础设计报告[R].北京:中国港湾工程有限责任公司,2011.
- [3] 张春生.码头门机轨道基础处理方法比较[J].水运工程,2006(3):69-71
- [4] BSI, BS8002—1994 Code of Practice for Earth Retaining Structures[S].
- [5] PIANC—2001 Seismic Design Guidelines for Port Structure[S].

(本文编辑 郭雪珍)