

高桩码头结构锈蚀破损原因分析及对策

丁乃庆, 姚占龙

(天津港务局, 天津 300456)

摘要:通过对天津港高桩码头的锈蚀破损现状调查数据的归纳分析, 指出高桩码头结构以锈蚀破损为其主要破损型式, 并提出了产生高桩码头结构锈蚀破损的主要原因。在分析钢筋混凝土结构中混凝土的破损原因基础上, 提出了减缓钢筋混凝土结构内钢筋锈蚀破损的主要措施, 可供既有码头结构的维护和新码头建设时参考。文中特别指出提高钢筋混凝土中混凝土施工质量的均匀性比采用高强混凝土及增加保护层混凝土厚度对减缓钢筋混凝土内钢筋锈蚀速度的效果更理想。同时提出利用先进的电子技术改造沿用几十年的振捣棒密实混凝土的传统工艺, 是当前钢筋混凝土施工中迫切需要解决的关键技术。

关键词: 码头; 锈蚀; 破损; 原因; 对策

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 10015-8443(2002)S0-0184-11

中国在以往土木工程的建设中, 过于片面地强调节约原材料, 忽视了耐久性。建设部门过分强调工程新建时的造价, 忽视了维修费用, 使钢筋混凝土结构的锈蚀破损现象十分严重, 其中又以海港码头的钢筋锈蚀破损现象更为严重, 中国在 20 世纪 60 年代对华南、华东地区 27 座海港的钢筋混凝土结构进行了调查, 发现钢筋锈蚀导致结构破坏的占 74%, 1981 年对华南 18 座使用了 7~25 年的钢筋混凝土海港码头进行了调查, 发现钢筋锈蚀导致结构破坏的占 89%^[1], 1984 年对浙江地区沿海的 22 个水工建筑物进行了调查, 统计的 967 个构件中, 锈蚀破损的构件占 55.6%, 说明华东沿海钢筋混凝土构件的锈蚀破损现象也十分严重^[2]。1985 年对连云港第 1、2 码头进行调查, 发现一半以上的纵梁发生钢筋锈蚀破损。湛江港码头的锈蚀破损现象更为严重, 1956 年建成中国自行设计和施工的第一座万吨级码头, 使用仅 7 年, 在 1963 年对其进行调查时已发现梁底混凝土发生顺筋裂缝, 有的主筋截面积损失率达 40%, 虽然次年进行了修复, 但在使用 20 年后发现钢筋锈蚀又十分严重。面板底的混凝土因钢筋锈蚀而大面积脱落, 面板底面露筋的剥落率达 89%, 锈蚀横梁的根数占调查横梁的 91%, 到 1998 年因钢筋锈蚀已严重威胁码头的安全, 决定拆除钢筋混凝土的上部结构, 改建钢板桩码头^[3]。1999 年对湛江港 6 个泊位又进行了调查, 发现钢筋混凝土梁大部分有严重的顺筋裂缝, 最大的裂缝宽度大于 2 cm, 对码头的安全造成严重的威胁。1981 年建成的北仑港 10 万吨级卸矿石码头和 2.5 万吨级的装船码头, 使用仅 6 年, 其上部结构已发现了严重的钢筋锈蚀破损^[4]。天津港自 1985 年开始对码头结构的工作状况进行不定期的调查, 发现 20 世纪 70 年代以前建造的码头一般都出现了较严重的锈蚀破损^[5]。客运码头建成后使用仅 8 年就出现锈蚀破损现象。1975 年建成的天津港三突堤码头, 于 1994 年发现在 26~27 段码头的连接段有 70 多块面板因钢筋锈蚀而产生保护层混凝土的大面积剥落, 对码头的安全性带来了十分严重的后果, 现天津港 20 世纪 80 年代以前建成的码头基本上都维修过一次, 可见钢筋锈蚀造成海港码头破损的严重性。

天津港解放后半个世纪以来, 在基础设施建设及货物吞吐量等方面得到了迅速的发展。20 世纪 60 年代初开始建造万吨级泊位, 70 年代开始建造 3 万吨级泊位, 到 80 年代开始建 5 万吨级的泊位, 建港速度不断加快, 促进了天津港生产的迅速发展, 目前天津港已跨入年吞吐量超亿吨的国际化深水大港。随着中国推行对内深化改革、对外扩大开放的政策, 特别是中国加入 WTO 以后, 货运量将会大幅度的增加, 从而使天津

收稿日期: 2000-06-01

作者简介: 丁乃庆(1954-), 男, 天津市人, 正高级工程师, 主要从事港务设施管理及研究。



港生产的迅速发展与码头结构的破损、老化之间的矛盾日益突出,为了充分发挥老码头的作用,不断改善老码头的工作状态,这将对码头设施管理部门提出了更高的要求。因此加强对老码头设施的科学管理、进一步维护码头结构的安全,搞清码头结构锈蚀破损的原因及改善码头工作状态对策的研究,成为码头设施管理部门亟待解决的关键问题之一。

1 天津新港码头结构锈蚀破损情况调查结果

从 1985 年以来,统计到 1998 年对天津港码头进行了 5 次普查,并进行了 3 次抽查,现将天津港码头结构破损情况资料数据整理如表 1 所示。

根据表 1 的数据统计分析知:

(1)前承台的面板破损多以钢筋锈胀产生的顺筋裂缝为主,如客运码头、7~8 段、9~11 段、14~15 段、16~17 段码头及三突堤堤头,21 段、22~24 段码头等。钢筋锈胀产生顺筋裂缝的主要原因为钢筋保护层混凝土的保护性能不足,这主要是保护层混凝土的厚度不足,配筋的间隔较疏所致,使钢筋锈胀时,保护层混凝土易胀裂,产生顺筋裂缝,因此前承台面板的保护层混凝土厚度应适当增大,以保证面板有足够的耐久性。

(2)前承台面板及横梁的钢筋锈蚀产生构件的破损率大于后承台面板及横梁的破损率。如前、后承台面板锈蚀产生构件的破损率百分比之比为:客运码头 89.2/13.5,7~8 段码头 80.5/7.8,9~11 段码头 36.0/12.3,12~13 段码头 21.5/11.1,14~15 段码头 86.9/45.0,16~18 段码头及三突堤堤头 94.4/8.4,21 段码头 56.5/28.7,22~24 段码头 70.1/11.9,25~26 段码头 53.4/20.7,27~29 段码头 45.5/7.6,一突堤堤头 51.8/7.3,三突堤堤头 55.3/5.5 等,说明风浪、船行波等对前承台面板的影响比后承台面板的影响大。虽然潮湿环境易使钢筋混凝土构件生锈,但是附着在前承台梁、板表面由海面蒸发的带盐雾水气容易风干,继而由海面蒸发的带盐雾水气又会附着在前承台面板表面,这种干湿交替的环境使前承台的梁、板更容易生锈。对于饱水的混凝土是不易碳化的,钢筋的钝化膜也不易破坏,所以后承台梁、板构件的锈蚀破损比前承台混凝土构件轻。前承台面板的工作环境比后承台差,从而使前承台面板比后承台面板容易生锈,以后对高桩码头设计时要特别加以注意,前承台面板的保护层混凝土应比后承台的厚,对不同工作环境可采取不同的保护层混凝土厚度。

(3)由于天津港横梁的混凝土一般有抗冻要求,所以梁的混凝土密实性比面板好,因此梁的破损程度比面板的破损程度小,且横梁的破损多为因箍筋锈胀而使保护层混凝土剥落露筋,主要是混凝土施工质量不均匀所致,混凝土质量较差的部位钢筋易生锈,而使混凝土胀裂。由此可知,采取措施提高混凝土的密实性及均匀性,对推迟混凝土内钢筋的锈蚀有明显的作用。

(4)由表 1 知,码头使用到某一年限后,面板及横梁的破损率会突然增加,如客运码头为 10 年、9~11 段码头为 18 年、12~13 段码头为 19 年、14~15 段码头为 27 年、16~18 段码头为 26 年、19~20 段码头为 15 年、21 段码头为 14 年、22~24 段码头为 13 年、25~26 段码头为 12 年、27~29 段码头为 10 年、一突堤堤头为 15 年、三突堤堤头为 15 年。由此可知,对于混凝土施工质量较差的码头普遍锈蚀破损的年限一般为 10~15 年,混凝土施工质量一般的码头普遍锈蚀破损的年限为 20~25 年。

(5)按常理早建的码头构件锈蚀破损率要大于后建的码头构件锈蚀破损率,但由调查结果知,天津港 20 世纪 80 年代建成的码头,其构件锈蚀率要比 20 世纪 70 年代建成的码头构件锈蚀率高,以前承台面板锈蚀率 30% 为例,20 世纪 80 年代建的码头一般只能使用 10 年左右,而 20 世纪 70 年代建的码头一般可使用近 20 年,由此可知,混凝土施工质量的好坏是影响钢筋锈蚀的主要原因,混凝土的质量好,既使其使用寿命较长,其锈蚀程度也不一定很严重,因此,提高海港码头耐久性的主要措施是提高混凝土的均匀性,要提高混凝土的均匀性,必须要改进现在的施工工艺,现在沿用几十年的人工操作振捣棒来浇筑混凝土,使不可避免制作的混凝土其质量有较大的差异性,即使使用高性能的混凝土,或增加保护层混凝土的厚度,由于氯离子是从混凝土质量最差的部位首先进入混凝土内,使钢筋生锈,同样会使构件内的钢筋生锈。因此提高海港码头耐久性的主要措施是改革现在混凝土浇筑的施工工艺及施工机械,尽可能使浇筑的混凝土质量均匀。

表 1 天津新港码头上部结构锈蚀破损构件统计表

码头泊位	构件部位	构件破损率(%) / 使用年限(年)								破损形态
客运码头	面板	前承台	2.9/6	50.9/9	58.7/14	71.1/16	80.4/17	89.2/18	92.7/19	裂缝为主
		后承台	1.1/6	4.3/9	4.3/14	7.4/16	10.5/17	13.5/18	17.4/19	剥落露筋为主
	横梁	前承台	25.5/6	43.6/9	45.7/14	80.9/16	80.9/17	80.9/18	83.0/19	剥落露筋为主
		后承台	1.1/6	30.8/9	30.8/14	33.0/16	33.0/17	34.0/18	34.0/19	裂缝为主
7~8 段	面板	前承台	39.9/11	42.6/16	43.5/18	59.3/19	80.5/20	80.5/21		裂缝为主
		后承台	2.7/11	3.7/16	5.5/18	7.3/19	7.8/20	7.8/21		破损较轻
	横梁	前承台								没有破损
		后承台	3.3/11	4.3/16	6.2/18	8.9/19	8.9/20	8.9/21		破损较轻
9~11 段	面板	前承台	0.0/7	0.0/15	4.6/17	20.6/18	36.0/19	36.0/20		裂缝为主
		后承台	0.1/7	0.6/15	5.1/17	11.3/18	12.3/19	12.3/20		破损较轻
	横梁	前承台	3.5/7		8.1/17	18.6/18	18.6/19	18.6/20		剥落露筋为主
		后承台	0.0/7	0.2/15	1.5/17	11.6/18	11.7/19	11.7/20		剥落露筋为主
12~13 段	面板	前承台	0.0/9	5.9/12	5.9/17	15.6/19	21.5/20	21.5/21	21.5/22	剥落露筋为主
		后承台	0.2/9	4.0/12	5.0/17	6.9/19	10.8/20	11.1/21	11.1/22	裂缝与剥落露筋共存
	横梁	前承台								没有破损
		后承台	0.0/9	5.2/12	5.2/17	12.5/19	22.8/20	23.0/21	23.0/22	剥落露筋为主
14~15 段	面板	前承台	48.7/25	84.5/27	84.5/33	86.9/35	86.9/36	86.9/37	86.9/38	裂缝与剥落露筋共存
		后承台	8.9/25	25.6/27	32.5/33	37.4/35	43.2/36	45.0/37	45.0/38	剥落露筋为主
	横梁	前承台	2.8/25	11.5/27	20.2/33	23.3/35	26.0/36	26.0/37	26.0/38	裂缝与剥落露筋共存
		后承台	7.5/25	9.6/27	9.6/33	14.0/35	25.0/36	25.0/37	25.0/38	剥落露筋为主
16~18 段	面板	前承台	5.2/25	82.0/26	82.0/33	86.3/35	94.3/36	94.3/37	94.3/38	裂缝为主
		后承台	1.0/25	3.8/26	3.9/33	4.7/35	7.3/36	7.29/37	8.4/38	破损较轻
	横梁	前承台								没有破损
		后承台	0.4/25	10.6/26	10.8/33	12.8/35	13.4/36	13.5/37	13.7/38	裂缝与剥落露筋共存
19~20 段	面板	前承台	0.0/10	0.0/13	9.1/15	23.9/16	23.9/17	23.9/18		剥落露筋为主
		后承台	1.8/10	3.5/13	8.4/15	12.6/16	13.9/17	15.7/18		剥落露筋为主
	横梁	前承台	0.0/10	0.0/13	27.9/15	49.0/16	51.0/17	51.0/18		剥落露筋为主
		后承台	22.9/10	27.0/13	30.7/15	31.6/16	32.0/17	34.7/18		
21 段	面板	前承台	0.0/12	25.1/14	43.0/15	43.0/16	56.4/17			裂缝为主
		后承台	0.0/12	4.0/14	6.0/15	10.9/16	28.7/17			剥落露筋为主
	合承台	1.4/12	5.1/14	5.1/15	6.4/16	8.4/17			破损较轻	
	横梁	前承台	24.5/12	49.1/14	49.1/15	51.7/16	55.1/17			剥落露筋为主
		后承台	1.7/12	29.0/14	29.0/15	29.6/16	30.7/17			剥落露筋为主



续表 1 天津新港码头上部结构锈蚀破损构件统计表

码头泊位	构件部位	构件破损率(%) / 使用年限(年)							破损形态
22~24段	面板	前承台	0.0/5	56.3/13	56.3/15	56.3/16	56.3/17	70.1/18	裂缝为主
		后承台	0.0/5	2.7/13	2.7/15	5.6/16	8.3/17	11.9/18	剥落露筋为主
	横梁	前承台	7.5/5	21.3/13	21.3/15	21.3/16	21.3/17	25.0/18	剥落露筋为主
		后承台	1.5/5	6.6/13	6.6/15	9.9/16	9.9/17	12.4/18	剥落露筋为主
25~26段	面板	前承台	0.0/4	35.0/12	35.0/14	39.0/15	40.4/16	53.4/17	裂缝与剥落露筋共存
		后承台	0.0/4	3.8/12	3.8/14	12.3/15	15.6/16	20.7/17	剥落露筋为主
	横梁	前承台	30.9/4	32.4/12	38.2/14	51.5/15	79.4/16	82.3/17	剥落露筋为主
		后承台	5.2/4	7.3/12	7.3/14	20.3/15	20.3/16	23.3/17	剥落露筋为主
27~29段	面板	前承台	32.3/10	32.3/11	37.9/12	45.5/13			剥落露筋为主
		后承台	5.7/10	5.7/11	6.7/12	7.6/13			破损较轻
	横梁	前承台	42.7/10	42.7/11	42.7/12	42.7/13			裂缝与剥落露筋共存
		后承台	31.1/10	31.1/11	31.1/12	33.0/13			剥落露筋为主
一突堤堤头	面板	前承台	0.5/7	40.9/15	46.4/17	51.4/18	51.8/19	51.8/20	剥落露筋为主
		后承台	0.0/7	4.7/15	4.7/17	7.3/18	7.3/19	7.3/20	破损较轻
	横梁	前承台	0.0/7	42.2/15	45.1/17	51.0/18	51.0/19	51.0/20	剥落露筋为主
		后承台	0.1/7	14.4/15	16.7/17	18.4/18	18.4/19	18.4/20	剥落露筋为主
三突堤堤头	面板	前承台	0.0/12	31.8/15	47.8/16	55.3/17			剥落露筋为主
		后承台	0.0/12	2.8/15	4.6/16	5.5/17			破损较轻
	横梁	前承台	0.0/12	24.2/15	28.3/16	31.4/17			裂缝与剥落露筋共存
		后承台	8.4/12	17.7/15	18.7/16	20.5/17			剥落露筋为主
南疆工作船码头	横梁	100/7	100/8	100/9	100/10			剥落露筋为主	

说明:(a)在 19~20 段泊位中,前承台面板的构件破损率有 2 个数,上面的数表示前承台面板区的破损率,下面的数为无梁板区的破损率。

(b)表中每个数的分子表示构件破损率,分母表示与构件破损率相对应的使用年限。

(6)表 1 中统计锈蚀破损构件是指用肉眼可见的混凝土表面有锈蚀破损的构件数,混凝土表面只有锈斑而混凝土没有破损现象的不计其数。另外,由于钢筋锈蚀始于混凝土内钢筋的表面,在构件的保护层混凝土没有胀裂、暴皮露筋前不易发现混凝土内钢筋的锈蚀现象,因此码头上锈蚀破损的构件数事实上远比表面混凝土破损剥落的构件数多。

2 钢筋混凝土构件锈蚀破损的原因分析

对于保护层混凝土的耐久性不足引起混凝土内的钢筋锈蚀,它可以通过研制开发高性能混凝土材料等途径来解决。混凝土对钢筋的保护性不足引起混凝土内的钢筋锈蚀,它可以增加保护层混凝土厚度来解决。以上两种解决途径的共同问题是必须通过改进浇注混凝土的施工机械、施工工艺等途径,以提高浇注混凝土的均匀性及密实性的目的。

(1)钢筋混凝土构件的工作环境对混凝土内钢筋锈蚀的影响



工作环境对混凝土内钢筋锈蚀的影响,不仅仅同环境的化学成分有关,而且还同物理(环境的温度、湿度等)、物理—化学(表面活性物质在水泥固相表面上的吸附等)、力学(结构不均匀沉降产生过大内力使混凝土开裂等)综合因素有关。

(a)由表 1 知,天津港 12~13 段码头使用 17 年时,前后承台面板破损率分别为 5.9%与 5.0%,前后承台横梁破损率分别为 0 与 5.2%;天津港 25~26 段码头使用 17 年时,其前后承台面板破损率分别为 53.4%与 20.7%,前后承台横梁破损率分别为 82.3%与 23.3%。比较 12~13 段码头与 25~26 段码头的构件锈蚀破损率调查资料知,25~26 段码头构件锈蚀破损率远比 12~13 段码头高,这是由于 25~26 段码头位于天津港三突堤东侧,而 12~13 段码头建于天津港一突堤东侧,根据天津港的自然条件资料知,天津新港地区的常风向为 SW 向,其次为 SE 向,且 25~26 段码头比 12~13 段码头更接近于外海,受风浪的影响大,所以 25~26 段码头要比 12~13 段码头的锈蚀破损严重。

(b)由表 1 可知,位于二、三突堤东侧的 19~20 段码头及 25~26 段码头,分别与位于二、三突堤西侧的 16~18 段码头及 22~24 段码头构件的锈蚀破损情况相比,在使用相同年限条件下,19~20 段与 25~26 段码头分别要比 16~18 段与 22~24 段码头的锈蚀破损情况严重,从而可知迎外海的码头要比背外海的码头锈蚀破损严重。

(c)从天津港码头的调查资料知,面板的锈蚀破损率大于梁的锈蚀破损率,前承台面板要比后承台面板锈蚀破损严重。

(d)空气中湿度偏高且混凝土构件的干湿交替能使空气中的水分和氧气通过混凝土中毛细孔入侵混凝土内的钢筋表面,易使钢筋锈蚀。

(e)混凝土表面的温度对混凝土内钢筋锈蚀也有较大的影响,这是因为混凝土是种多孔材料,混凝土表面温度高,表层混凝土的毛细孔中游离水蒸发风干快,当混凝土在下一次接触海水时,混凝土中的毛细孔会将含有氯离子的海水吸入混凝土中。混凝土的风干程度越高,毛细孔吸入海水的作用越大,混凝土内氯离子的含量也会明显增多。

(f)海水的氯离子浓度对混凝土的钢筋锈蚀也有相当的影响,因为海水中存在的氯离子是混凝土内氯离子的源泉。空气中的 CO_2 气体侵入混凝土内,使混凝土碳化,混凝土内饱和溶液的 pH 值下降,从而使混凝土中所含水分的碱度下降,造成混凝土内钢筋钝化膜易破坏。根据有关资料知,混凝土的碳化速度较慢。对混凝土中钢筋锈蚀,氯化物远大于混凝土碳化的影响,所以对混凝土的碳化现象不予讨论。

(g)对于天津港每年冰期长约 3 个月,因此天津港高桩码头设计时对梁有抗冻要求,混凝土的抗冻标号一般为 D 300,而码头面板设计时混凝土没有抗冻要求。从天津港码头破损状况调查资料表 1 知,天津港高桩码头梁的锈蚀破损率远比面板低,这说明有抗冻要求的构件锈蚀破损率低于没有抗冻要求的构件,从而证明对北方港口来说,冻融也为码头锈蚀破损的主要原因之一,以后在面板设计时也应考虑其抗冻要求。

(h)天津港为有潮汐港,每日发生高低潮 2 次,属于不规则半日潮,最大潮差为 4.37 m,平均潮差为 2.47 m。年平均波高为 0.5 m,最大波高达 3.7 m。天津港码头设计时以新港理论基准面为基准,码头标高一般为 5.6 m~5.8 m,最高潮位为 5.3 m,设计高水位为 4.3 m,考虑到码头使用多年自身的沉降及波浪的作用,天津港码头梁、板处于浪溅区,梁板构件长期受海水干湿交替作用,使天津港面板容易产生锈蚀破损。

(2) 钢筋混凝土材料性质对混凝土内钢筋锈蚀的影响

(a) 混凝土材料

由于混凝土是一种多孔材料,海水中氯离子等腐蚀性介质可以通过混凝土的孔隙侵入混凝土内,从而使混凝土内的钢筋生锈,因此可以说用多孔的混凝土材料建造海港码头,混凝土内的钢筋注定要生锈的命运,只是锈蚀的时间早迟不同。腐蚀性介质侵入混凝土内的程度取决于保护层混凝土的密实度、均匀性及保护层混凝土的厚度,在阻碍腐蚀性介质侵入混凝土中的作用上,提高混凝土密实度、均匀性的效果要比增加保护层混凝土厚度的效果好,而对于混凝土的密实度和均匀性,又以提高混凝土质量均匀性的效果显著。

钢筋混凝土结构,特别是在受弯构件中混凝土开裂几乎是不可避免的,因此提出这样一个问题:混凝土的裂缝对混凝土内钢筋的锈蚀有什么影响呢?从天津港大量调查发现,对于裂缝宽度小于 0.2 mm 的构件进行连续几年的观察,没有发现裂缝发展,也没有发现裂缝附近的混凝土有锈迹,这说明构件上有小于 0.2 mm



的裂缝,对混凝土内钢筋锈蚀的影响可以不予考虑。

(b) 钢筋材料

钢是通过高温熔炼,从铁矿石中夺走其中的氧、硫等元素才形成的,所以它处于不稳定状态,在环境介质的作用下有力图恢复为较稳定的原有氧化物状态,这是钢筋在氧和水作用下,必然会生锈的原因所在。另外在钢筋表面一般均具有电化学的不均匀性:如钢筋金相组织的不均匀性(钢筋内有碳素体、铁素体、杂质等),钢筋表面的不均匀性(高温下氧化皮或铁锈的不完整),物理条件的不均匀性(钢筋表面各区段的温度差,外部电场的不均匀)等,从而使钢筋表面形成大量短路的微电池,它将引起钢筋的电化学腐蚀。

由于钢的化学性质不稳定,保护层混凝土又是一种多孔的材料,由它们组合的钢筋混凝土结构,工作在海洋腐蚀性介质的环境中,必然导致钢筋混凝土内的钢筋生锈,这是毫无疑问的。目前摆在国内外工程技术人员面前的任务是如何千方百计设法推迟混凝土内钢筋的锈蚀时间。

(3) 钢筋混凝土构件锈蚀破损设计上的原因

(a) 根据有关规范规定:高桩码头设置伸缩缝的间距为 40~60 m,伸缩缝的宽度 2~3 cm,所以天津港高桩码头伸缩缝宽度均设计为 2 cm。因为伸缩缝是为了消除温度应力而设,它的设计宽度应同施工季节有关。曾对天津港高桩码头的伸缩缝工作状态进行过调查,发现不少伸缩缝挤死,且伸缩缝两侧板头混凝土挤碎,钢筋有锈蚀现象。因此建议规范中规定的伸缩缝宽度要适当放宽,并根据施工季节作适当的调整。

(b) 码头的结构形式选择要适合地质条件及基桩要有足够的承载力,如 × × 港的盐码头建于 1983 年,为高桩板梁码头,基桩采用 55 cm × 55 cm 预应力钢筋混凝土空心方桩,上部结构采用预应力的三跨连续梁。码头面的荷载为将盐装船的皮带机,且机架布置在桩顶上,没有多大外荷载,但是在 1990 年进行现场调查时就发现 45% 的横梁出现了沿梁横截面的环形受力裂缝,根据分析知,由于连续梁对基础不均沉降的适应性差,盐码头横梁开裂并不是码头面上外荷载引起的,是桩的不均匀沉降产生过大的内力所致。

(c) 根据大量的现场调查资料知,高桩码头结构在浪溅区附近锈蚀破损最为严重,但设计时没有采取有效的措施,为了提高海港码头的防腐效果,建议在高桩码头设计时,浪溅区附近可采用高性能钢筋,如采用环氧涂层钢筋等,以提高钢筋自身的抗锈蚀能力。美国、加拿大、英国、挪威、日本、南朝鲜、印度、新加坡、马来西亚、泰国、印尼等国都有采用环氧涂层钢筋建造桥梁和码头等,国内于 1997 年及 1998 年先后由加德士石油公司在汕头的 LPG 码头和上海宝钢集团公司在宁波马迹山的矿石中转码头中应用环氧涂层钢筋^{[12]、[13]}。

由于环氧涂层钢筋造价相对较高,运输和施工要求较严格,否则会将环氧涂层碰破,失去保护作用,所以要将码头所有钢筋均采用环氧涂层钢筋不合国情,况且也没有必要。根据大量的现场调查资料知,混凝土内钢筋锈蚀最严重的为浪溅区,所以在以后码头设计时,建议在浪溅区采用环氧涂层钢筋,其它部位仍用普通钢筋,这样既可以提高码头使用的耐久性,而增加的成本也有限。

(d) 由于高桩码头下通风条件差,且湿度大,所以钢筋混凝土构件易产生锈蚀破损,今后设计中应注意改进高桩码头整体结构,有利于码头下面的通风,改善梁和面板的工作环境。

(e) 根据调查资料分析知,前承台面板锈蚀率比较高,由此可知前承台面板混凝土的保护性能不足,建议码头前沿的面板保护层混凝土厚度应适当加大。

(4) 钢筋混凝土构件锈蚀破损的施工原因

(a) 提高钢筋混凝土结构耐久性的首要问题是解决混凝土施工质量的均匀性问题

要使混凝土内钢筋不易生锈,除了要提高钢筋本身的抗蚀性外,唯一的办法是提高保护层混凝土对钢筋的保护性能。混凝土的保护性能好坏主要取决于混凝土的密实性、均匀性和保护层混凝土的厚度。保护层混凝土的厚度不可能无限制的增大,增大保护层混凝土的厚度不但会增加构件的自重,而且使构件表面容易出现裂缝。所以保护混凝土内钢筋不易生锈的最有效办法为提高混凝土的密实性及均匀性,这可从两个方面来考虑,一方面是提高混凝土材料的性能,提高混凝土自身的密实性,或在混凝土表面涂防腐涂料;另一方面是改进施工工艺及施工机械,提高混凝土的均匀程度。无论混凝土性能多么好、保护层混凝土多么厚,由于混凝土拌合物本身没有自密实性,必须要通过对混凝土的振捣密实使混凝土具有强度及密实性。如果施工质量不好,振捣不足以达到混凝土应有的密实度,且施工质量不均匀,这样混凝土内的钢筋就容易生锈,不能充分发挥高性能混凝土对钢筋的保护作用,从而可知,希望推迟混凝土内的钢筋锈蚀年限,可采用高性能



混凝土、增大保护层混凝土的厚度、改进施工工艺及设备以提高混凝土密实度及均匀性等诸多措施,其中以改进施工工艺及设备以提高混凝土的密实性及均匀性的效果最为显著,所以说混凝土的施工质量是影响钢筋混凝土构件耐久性的关键。从大量的调查事实知:

一般氯离子侵入到混凝土中的浓度与时间有关,码头使用年限越长,混凝土内钢筋表面的氯离子浓度也应越大,构件的锈蚀破损也越严重,可事实不全如此,如 1979 年建造的客运码头使用不到 10 年,前承台面板锈蚀破损率达 50%,客运码头设计荷载为 30 kN/m^2 ,最大荷载为 6 t 铲车。而 1961 年建造的 16~18 段码头上,除 30 kN/m^2 均布荷载外,还有火车荷载、60 t 平板车,作用荷载比客运码头大,但使用 25 年,构件基本上是好的。从科技进步、设计水平、材料性能来说,应该后建的客运码头要比前建的 16~18 段码头质量好,可事实上客运码头锈蚀破损远比 16~18 段码头严重。

对于不同构件来说,混凝土表面锈斑的出现及混凝土的剥落露筋部位都是随机的。对于同一个构件来说,有些部位钢筋没有锈蚀,有些部位混凝土剥落露筋,不同部位钢筋锈蚀的程度明显不一样。

这说明即使是同一构件,处于不同部位混凝土的质量也不同,有些构件施工时由于漏浆或振捣不实,表面还会有狗洞、蜂窝等现象。

以上的调查事实说明了什么?

以上现象若是混凝土材料性能不好造成的,则混凝土对钢筋的保护性能应普遍都差。因为对于同一个构件工作在相同的环境中,使用相同的混凝土保护材料,照例混凝土内钢筋锈蚀形态差不多,构件内钢筋要不锈都不锈,要生锈普遍生锈,保护层混凝土剥落应为大面积普遍剥落。但事实上同一构件内钢筋有生锈的,有没有生锈的,混凝土内钢筋锈蚀形态千差万别。这说明以往使用的混凝土材料,只要浇筑得好,混凝土内钢筋一般也难以生锈,而浇筑得不好,即使是采用高性能混凝土,混凝土内钢筋一般也会生锈。根据现场调查资料知,钢筋锈蚀位置是随机的,同一构件不同位置混凝土的密实度可相差许多倍、后建的码头钢筋的锈蚀现象比早建码头严重等现象,不能说明混凝土材料的性能不好或设计的保护层混凝土厚度不足,只能说明混凝土施工质量的不均匀性。

根据以上分析可知,海港码头锈蚀破损的主要原因并非是混凝土材料性能差及保护层混凝土厚度不足所致,只要施工能保证混凝土的密实性及均匀性,码头正常使用在 50 年以上是没问题的,关键是混凝土的施工工艺及施工机械难以保证混凝土施工的密实性及均匀性。几十年来浇筑混凝土都沿用振捣棒由人工进行振捣,所以混凝土的施工质量受工人的施工经验、责任心、疲劳程度、情绪等诸多因素影响,难以保证混凝土施工质量的均匀性。如果施工工艺和施工机械不能解决混凝土施工质量的均匀性问题,即使增加保护层混凝土厚度或是改善混凝土的性能,混凝土内钢筋的锈蚀问题也解决不了,这是因为氯离子的入侵不服从统计规律,而是根据最差优先原则入侵混凝土中,即什么部位的混凝土密实度最差,氯离子就首先由该部位入侵到混凝土内,致使该部位的钢筋先生锈。

综上所述,要解决海港码头钢筋锈蚀首要问题是解决混凝土施工质量的均匀性问题,利用微电脑控制的高科技改进以往的施工机械,尽量克服人为因素对混凝土施工质量的影响。其次才要采用高性能混凝土,混凝土防腐涂料等,以提高混凝土对钢筋的保护性能,从而大大提高钢筋混凝土结构的耐久性。因此呼吁有关部门组织力量,改革混凝土的施工工艺及施工机械,开发智能振捣棒,使施工的混凝土性能更均匀,这是提高钢筋混凝土结构耐久性迫切需要解决的关键问题。

(b) 施工过程中要确保保护层混凝土厚度

控制保护层混凝土厚度的传统施工工艺是在钢筋上绑扎砂浆垫块来控制。根据大量调查资料知,在施工过程中由于振捣棒的振动,带动钢筋骨架的振动,对于保证保护层混凝土厚度的砂浆垫块固定不牢部位往往难以保证保护层混凝土厚度,特别是“T”型梁的翼缘,难以保证保护层混凝土厚度,所以梁的锈蚀破损绝大部分在翼缘。

天津港 26 段码头建于 1981 年,27 段码头建于 1985 年,到 1995 年对其进行调查时,发现 26~27 段码头连接段面板的保护层混凝土大面积剥落,不少面板箍筋已经锈断,表面留下呈网格状的锈迹,螺纹钢的主筋靠保护层混凝土侧螺纹已锈平。有些面板在混凝土表面能见到主筋,几乎没有保护层混凝土,经测量,不少预应力筋的保护层混凝土厚度只有 1~2 cm,远没有达到设计上对保护层混凝土厚度的要求,所以面板使



用 10~15 年就发生大面积保护层混凝土脱落、钢筋严重锈蚀的现象,然后更换了 65 块新面板。

混凝土施工过程中由于对施工质量控制不严,不能保证达到保护层混凝土的设计厚度,从而造成混凝土内钢筋锈蚀的事例也不少。

(c) 码头段与段之间的伸缩缝施工质量^[11]

由于一般施工作业人员对伸缩缝的意义不够明确,所以施工中对保证伸缩缝宽度的重视程度不够,造成伸缩缝施工中的诸多质量问题,从而产生过大的温度应力使伸缩缝两侧板头出现混凝土挤碎露筋、生锈现象,甚至使面板产生严重的破损。经现场调查知,伸缩缝的施工质量存在如下主要问题:

设计时伸缩缝的位置设置不合理会使构件发生破损而锈蚀,既使设计时设置了合理的伸缩缝,但施工时往往会产生没有按设计要求位置预留伸缩缝的现象。

由于施工时抢进度,面板又比较笨重,将面板吊到码头上安装后没有按设计要求将伸缩缝调整到要求的宽度。

面板制作过程中,混凝土浇筑振捣时有时会引起模板的变形,从而使面板制作的实际尺寸比设计要求偏大,安装时难以保证设计的伸缩缝宽度。

面板安装时预留了伸缩缝,但是在浇筑码头面层时,将混凝土落入伸缩缝内,又将伸缩缝堵死。

对天津港高桩码头伸缩缝的工作状况调查时发现,以上诸多原因造成面板破损而引起钢筋锈蚀的现象不少。

(5) 钢筋混凝土构件锈蚀破损在使用管理上的原因

码头的功能是进行装卸作业,由于违章作业造成构件破损、开裂使氯离子腐蚀性介质长驱直入而引起钢筋生锈。

(a) 装卸重件、大件而不采取相应措施或码头的严重超载使面板或梁开裂。

(b) 由于操作失误,吊装货物从空中落下,使钢筋混凝土构件破损。

(c) 船舶靠岸失误,将码头构件撞坏。

(d) 为了适应船舶大型化,不采取有效的技术措施在小码头前靠大船,使码头构件受损或码头前沿超挖使岸坡滑动,造成桩的断裂。

由于使用、管理不当,造成构件的混凝土开裂、破碎,使混凝土失去了保护钢筋的作用而生锈。

3 提高海港码头结构耐久性的主要措施

众所周知,混凝土是一种多孔的材料,而钢材的化学稳定性差,易还原成氧化状态,所以由混凝土材料与钢筋组成的钢筋混凝土构件,在腐蚀性介质环境中混凝土内钢筋生锈是必然的,是不可避免的。工程技术人员通过各种途径进行研究,目的是如何延迟混凝土内钢筋的锈蚀,以期提高钢筋混凝土构件使用的耐久性。

通过研究分析,指出提高海港码头使用耐久性的主要措施为:

(1) 推迟混凝土内钢筋开始生锈时间及减慢钢筋锈蚀速度的措施

要提高海港码头使用的耐久性,则必须尽可能推迟混凝土内钢筋开始生锈的时间及减慢钢筋的锈蚀速度。要达到以上目的,必须对混凝土内的钢筋采取有效的保护措施,以提高混凝土对钢筋的保护效果。

(a) 采用高性能混凝土,提高保护层混凝土的密实性。

(b) 根据对构件不同位置密实度的检测知,同一构件不同位置的密实度可相差许多倍(这里是选择一般部位的混凝土检测结果,如果已锈蚀破坏部位的混凝土与较好部位的混凝土相比则其密实度相差远远要大得多),混凝土质量极不均匀。由于氯离子入侵混凝土内不遵循统计规律,是按最差优先原则入侵,从而可知,构件大部分混凝土密实度较好,有少数部位混凝土密实度较差(如蜂窝、狗洞部位),此构件也逃脱不了锈蚀破损的命运。要想提高海港码头耐久性最有效的办法是尽量提高混凝土质量的均匀性,这是国内外都没有很好解决而又亟待解决的难题。要提高混凝土质量的均匀性,必须用微电子技术改造沿用几十年的振捣棒密实混凝土的施工机械和施工工艺。

(c) 在施工机械难以很好解决混凝土质量的均匀性条件下,适当增加保护层混凝土的厚度,以提高保护层混凝土对钢筋的保护性能。保护层混凝土的厚度主要决定混凝土质量的密实性及均匀性,如果混凝土质量的



密实性及均匀性好,保护层混凝土厚度可以小一些,反之,保护层混凝土厚度需适当大一些,以弥补混凝土质量较差处对钢筋保护的不足。如以后的施工机械能有效地提高混凝土质量的密实性及均匀性,则保护层混凝土厚度可适当减小些。

在以上三个措施中,提高混凝土质量密实性及均匀性是保护钢筋最有效的措施。

(2) 钢筋混凝土结构耐久性的评定指标

(a) 混凝土构件锈蚀破损的部位没有规律,是随机出现,这与混凝土浇筑时振捣密实没有规律,随现场施工人员而异相关连,从而可知钢筋混凝土构件的锈蚀破损同混凝土浇筑时振捣密实工艺有密切的关系。

(b) 根据混凝土拌合物振捣密实的程度不同,使混凝土取得不同的密实度。构件不同位置混凝土的密实度不同导致了混凝土施工质量的不均匀,由于腐蚀性介质入侵混凝土中不遵守统计规律,而遵守最差优先的原则,从而使钢筋混凝土构件中密实度最差的部分先开始生锈,随着使用年限的增长,锈蚀现象逐渐向密实度好方向扩展。事实上在同一构件中混凝土具有相同的水灰比及保护层混凝土厚度,但构件中不同部位的混凝土锈蚀破损时间可相差好几倍甚至十几倍,从而可推知,如果浇筑的混凝土能普遍保持锈蚀破损构件中完好部分的混凝土密实度,则钢筋混凝土构件使用的耐久性可提高几倍至十几倍。

(c) 从以上分析知,混凝土施工质量的密实性及均匀性是影响钢筋混凝土构件使用耐久性的主要因素,它比采用高性能混凝土及增加保护层混凝土厚度的效果更明显,因此如果能保证混凝土施工的密实性及均匀性,即使采用普通混凝土其使用耐久性达 50 年以上,甚至达 100 年也是可能的。以往工程界过分注重混凝土品质及保护层的厚度,而忽视了混凝土质量的密实性及均匀性。其实混凝土质量的密实性及均匀性是提高钢筋混凝土耐久性的关键,必须引起工程技术界极大重视。

(d) 评定钢筋混凝土构件耐久性的指标依次为:混凝土的均匀性,混凝土的密实性,保护层混凝土厚度,高性能混凝土。

(3) 开发研制自密实混凝土的外加剂

冶炼钢、铁时,由于钢、铁水具有流动性,所以制成的钢、铁材料质量均匀。但是混凝土浇筑过程中,由于从搅拌机中倒出来的混凝土拌合物具有不流动性,所以无法自密实,必须通过振捣工艺才能使混凝土拌合物密实。因混凝土拌合物振捣密实工艺由人工来完成,所以很难保证混凝土施工质量的均匀性,从而不能充分发挥混凝土这种材料的使用耐久性,使不少钢筋混凝土结构使用不到 10 年就开始锈蚀破损,混凝土这种材料的耐久性不能得到充分的利用。为了提高混凝土的密实性及施工质量的均匀性,所以要开发研制自密实混凝土的外加剂,从而提高钢筋混凝土结构使用的耐久性。

(4) 提高钢筋自身的抗锈蚀能力

根据调查的资料知,处于浪溅区的混凝土内钢筋容易锈蚀,因此处于浪溅区的钢筋可采用环氧涂层钢筋,重点提高使钢筋易锈部位的钢筋抗锈蚀能力,以期提高海港码头使用的耐久性。为了节约工程造价,在非浪溅区部位仍可用以往采用的普通钢筋。

以往工程技术界过分注重混凝土的品质及保护层的厚度,而忽略了混凝土质量的均匀性。混凝土质量的均匀性是提高钢筋混凝土结构耐久性的关键。

(5) 处于高桩码头不同位置的构件,可采用不同的防腐措施

根据调查资料知,高桩码头前承台面板的钢筋锈蚀率较高,建议设计时对前承台面板适当增加保护层混凝土厚度,或在板底涂混凝土防腐涂料等措施。对于防腐涂料除了要有良好的防腐性能及其本身较好的耐久性外,混凝土防腐涂料施工的均匀性问题同样是能否对钢筋起良好保护作用的关键。

(6) 高桩码头预留伸缩缝宽度应考虑施工季节

高桩码头设计与施工规范规定码头结构段与结构段之间的伸缩缝宽度为 2 cm ~ 3 cm,这里没有考虑施工季节对伸缩缝宽度的影响,所以造成已建码头许多伸缩缝挤死,起不到伸缩缝应有的作用。合理的伸缩缝宽度要随施工季节作相应的变动,夏季施工时伸缩缝宽度可在 1 ~ 2 cm 范围,冬季施工时伸缩缝宽度应为 4 ~ 5 cm 范围,建议设计规范应作相应的补充说明。

(7) 开发码头底下通风良好的新型码头结构

现有一些高桩码头结构型式的码头底下通风不良,使码头上部结构长期工作在潮湿的环境中,由于空气



的湿度对混凝土内钢筋锈蚀的影响很大,所以要开发新型的码头结构型式,以利于码头底下有良好的通风,改善码头上部结构的工作环境,延迟混凝土内钢筋的锈蚀时间,提高码头上部结构使用的耐久性。

(8) 北方港口码头的混凝土需要采取抗冻措施

从天津港有抗冻要求的梁与没有抗冻要求板的锈蚀破损情况比较知,混凝土的冻融破坏是北方港口码头锈蚀破损的主要原因之一,所以北方海港使用的混凝土最好有抗冻要求,特别是在浪溅区部位的混凝土必须要有抗冻要求。

(9) 确保钢筋混凝土保护层混凝土厚度的技术措施

施工时要严格按设计要求使保护层混凝土有足够的厚度,在“T”型梁的翼缘处施工时更应特别注意。

(10) 建立钢筋混凝土材料耐久性的设计指标

以往钢筋混凝土设计规范中,对钢筋混凝土构件的设计没有耐久性设计指标,只有强度指标和抗冻指标,所以提出建筑物的设计基准期为多少年是没有理论根据的,因此以往预制的钢筋混凝土构件没有进行耐久性指标的抽验就运往工地安装,致使有些不合格构件也应用在工程中,造成有些码头结构用不了几年就锈蚀破损,然后进行维修,有些维修还需停产,带来巨大的经济损失。建议以后对混凝土的耐久性指标进行专题研究,完善钢筋混凝土结构的设计规范。

(11) 码头尽可能不要超载使用

尽量避免码头超载使用,特别是长期超载。在装卸重件时切勿将重件长时间堆放在码头上。

4 结论

众所周知,混凝土是一种多孔的材料,而钢材的化学稳定性差,易还原成氧化状态,所以由混凝土材料与钢筋组成的钢筋混凝土构件,在腐蚀性介质环境中混凝土内钢筋生锈是必然的,是不可避免的。工程技术人员通过各种途径进行研究,目的是如何延迟混凝土内钢筋的锈蚀,以期提高钢筋混凝土构件使用的耐久性。

本研究根据大量码头锈蚀破损现象的调查资料及现场取混凝土样品化验氯离子在混凝土内分布,初步总结出了高桩码头锈蚀破损原因及提高钢筋混凝土构件耐久性的措施,可供新高桩码头的建设和既有高桩码头的维护时参考。

通过研究,对提高海港码头使用耐久性得出如下几点主要结论:

(1) 腐蚀性介质入侵混凝土中遵循最差优先的原则,所以提高钢筋混凝土构件耐久性的最主要途径是提高保护层混凝土的均匀性。要提高保护层混凝土的均匀性,必须利用先进的微电子技术改造沿用几十年的由振捣棒用人工密实混凝土拌合物的施工工艺及施工设备。

如果混凝土的均匀性差,则混凝土内钢筋开始生锈的时间,以混凝土密实度最差部位钢筋表面氯离子浓度达到临界浓度时间起算。

(2) 要提高钢筋混凝土构件的耐久性就是要提高保护层混凝土对钢筋的保护性能,其措施依次还有:

(a) 根据氯离子入侵混凝土内规律的研究知,混凝土的密实性对钢筋混凝土构件的耐久性有十分明显的影响,所以要提高钢筋混凝土构件的耐久性,要尽可能提高保护层混凝土自身密实性。

但是混凝土材料的密实性是要通过振捣等工程措施来实现,如果在振捣密实过程混凝土质量不均匀,使某些部位混凝土没有达到要求的密实度,则氯离子等腐蚀性介质通过密实度较差的部位入侵到混凝土内导致钢筋生锈,从而使密实性好的高性能混凝土对钢筋也起不到应有的保护作用,钢筋混凝土构件的耐久性明显下降。

(b) 增加保护层混凝土厚度,使氯离子入侵到钢筋表面的路径增长,从而延迟混凝土内钢筋的锈蚀时间,起到提高海港码头结构使用耐久性的作用。

如果能很好地解决混凝土质量均匀性的问题,用以往的混凝土材料及保护层混凝土厚度为 5 cm 的构件,正常情况下使用 30 年以上是可以保证的,现在海港码头钢筋锈蚀严重主要是混凝土的均匀性太差所致。以往工程技术界过分注重混凝土的品质及保护层的厚度,而忽略了混凝土质量的均匀性。混凝土质量的均匀性是提高钢筋混凝土结构耐久性的关键。必须引起工程技术界极大重视。

(c) 钢筋混凝土构件在浪溅区混凝土内的钢筋易生锈,建议在浪溅区部位采用环氧涂层钢筋及混凝土内



渗阻锈剂,以增强钢筋自身的抗锈能力及混凝土的阻锈能力。为了节约整个工程的造价,在非浪溅区部位仍可用以往采用的普通钢筋及混凝土。

(d)根据调查资料知,高桩码头前承台面板的钢筋锈蚀率较高,建议设计时对前承台面板适当增加保护层混凝土厚度,或在板底涂混凝土防腐涂料等措施。对于防腐涂料除了要有良好的防腐性能及其本身较好的耐久性外,混凝土防腐涂料施工的均匀性问题同样是能否对钢筋起良好保护作用的关键。

(e)高桩码头设计与施工规范规定码头结构段与结构段之间的伸缩缝宽度为 2 cm,这里没有考虑施工的季节,所以造成已建码头许多伸缩缝挤死,起不到伸缩缝应有的作用。合理的伸缩缝宽度要随施工季节作相应的变动,夏季施工时伸缩缝宽度可在 1~2 cm 范围,冬季施工时伸缩宽度应为 4~5 cm 范围,建议设计规范应作相应的补充说明。

(f)现有一些高桩码头结构型式使码头底下通风不良,码头上部结构长期工作在潮湿的环境中,由于空气的湿度对混凝土内钢筋锈蚀的影响很大,所以要开发新型的码头结构型式,以利于码头底下有良好的通风,改善码头上部结构的工作环境,延迟混凝土内钢筋的锈蚀时间,提高码头上部结构使用的耐久性。

(g)从天津港有抗冻要求的梁与没有抗冻要求板的锈蚀破损情况比较知,混凝土的冻融破坏是北方港口码头锈蚀破损的主要原因之一,所以北方海港使用的混凝土最好有抗冻要求,特别是在浪溅区部位的混凝土必须要有抗冻要求。

(h)施工时要严格按设计要求保证保护层混凝土有足够的厚度,在“T”型梁的翼缘处施工时更应特别注意。

(i)以往预制的钢筋混凝土构件没有进行耐久性指标的抽验就运往工地安装,致使有些不合格构件也应用在工程中,造成有些码头结构用不了几年就锈蚀破损,然后进行维修,有些维修还需停产,带来巨大的经济损失。建议以后出厂的预制构件不但要进行强度抽验,而且还要进行耐久性指标的抽验,象其它产品一样,建立预制构件的合格证制度,从而确保工程上的构件均为合格品,保证结构使用的安全性和耐久性。

(j)尽量避免码头超载使用,特别是长期超载。在装卸重件时切勿将重件长时间堆放在码头上。

总之要提高海港码头结构的耐久性,必须要设计、施工及使用管理部门通力合作,创造精品,奉献社会,以提高社会的整体效益。

参考文献

- [1] 洪定海,潘德强,等. 华南海港钢筋混凝土码头锈蚀调查报告[J]. 水运工程,1982(2):15~20.
- [2] 童保全,王硕威,等. 浙东沿海水工钢筋混凝土建筑物钢筋腐蚀破坏调查与分析[R]. 南京:河海大学,1984.
- [3] 王胜年,张举连,等. 湛江港一区南一期工程高桩码头防腐工程可行性研究[J]. 广州:四航院科研所,1998.
- [4] 范卫国,潘今岱,等. 北仑港码头钢筋混凝土上部结构腐蚀破坏调查报告[C]. 海岸工程两岸研讨会论文集,1997.115-119.
- [5] 顾绳仁,田双珠,刘卫民. 天津港码头破坏状况调查报告[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1985.
- [6] 郑锋勇,田双珠,张强,孙百顺. 天津新港港区码头混凝土构件破损情况调查及分析[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1996.
- [7] 田双珠,郑锋勇. 天津新港港区码头混凝土构件破损情况调查分析报告[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1992.
- [8] 张强,郑锋勇,田双珠. 天津新港港区码头混凝土构件破损情况调查及分析[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1998.
- [9] 王广德,张强,郑锋勇. 天津港码头结构及构件现状调查[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1999.
- [10] 竺存宏,田双珠,郑锋勇. 天津港 26~27 段码头连接段面板破损的调查报告[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所,1995.
- [11] 竺存宏,朱崇诚,李颖. 天津港高桩码头伸缩缝状况的调查报告[R]. 交通部天津水运工程科学研究所,1995.
- [12] 卢永昌. 环氧树脂涂层钢筋在汕头 LPG 码头工程中的应用[J]. 水运工程,1999(8):48~53.
- [13] 杨万里,吴小蓉. 环氧树脂涂层钢筋的技术原理、发展过程及国内外应用情况[J]. 水运工程,1999(8):1-7.